

**RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TIPE *AXIAL
FLOW UNDERWATER TURBINE* MENGGUNAKAN
DIFFUSER DENGAN GENERATOR MAGNET PERMANEN
RADIAL 3 FASA 18S 12P *BLADE TIP POWER SYSTEM***

SKRIPSI

**Oleh :
BUDI SATRIYO
NIM. 125100601111017**

**Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Sarjana Teknologi Pertanian**



**JURUSAN KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2016**

LEMBAR PERSETUJUAN

Judul TA : Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tipe
Axial Flow Underwater Turbine
Menggunakan *Diffuser* dengan Generator
Magnet Permanen Radial 3 Fasa 18s 12p
Blade Tip Power System

Nama Mahasiswa : Budi Satriyo
NIM : 125100601111017
Jurusan : Keteknikan Pertanian
Fakultas : Teknologi Pertanian

Pembimbing Pertama,

Pembimbing Kedua,

Bambang Dwi Argo, DEA.

NIP.19610710 198601 1 001

Rini Yulianingsih, STP, MT.

NIP. 19740717 200812 2 002

**Tanggal persetujuan:
23 Mei 2016**

**Tanggal persetujuan:
23 Mei 2016**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul TA : Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tipe
Axial Flow Underwater Turbine
Menggunakan *Diffuser* dengan Generator
Magnet Permanen Radial 3 Fasa 18s 12p
Blade Tip Power System

Nama Mahasiswa : Budi Satriyo
NIM : 125100601111017
Jurusan : Keteknikan Pertanian
Fakultas : Teknologi Pertanian

Penguji I,

Penguji II,

Bambang Dwi Argo, DEA.
NIP.19610710 198601 1 001

Rini Yulianingsih, STP, MT.
NIP. 19740717 200812 2 002

Penguji III,

Ketua Jurusan,

Dr. Ir. Anang Lastriyanto,
M.Si
NIP. 19621004 199002 1 001

Dr. Ir. J. Bambang Rahadi
W, MS
NIP. 19560205 198503 1 003

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Jakarta, 4 Agustus 1994, dari seorang Ayah dan Ibu yang bernama Sutrisno dan Maryani. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN Lagoa 01 Pagi Jakarta tahun 2006, kemudian menyelesaikan pendidikan di SMPN 30 Jakarta tahun 2009 dan SMAN 75 Jakarta tahun 2012. Pada tahun 2016 penulis berhasil menyelesaikan pendidikannya di PS Teknik Bioproses, Jurusan Keteknikan Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya.

Pada masa pendidikannya, penulis pernah menjadi Finalis Olimpiade “BIOLEAF” 2011 tingkat Jabodetabek, Juara 1 PIMBA FTP 2012, Juara 2 PIMBA UB 2012, Finalis WTDNC 2012, Finalis LKTI PINISI MARIFEST 2013, Juara 2 Musabaqah KTI Al-Qur’an FTP 2013, Finalis LKTI UNDIP Science Fair 2013 dan Pendanaan PKM Karsa Cipta 2015. Selain itu, penulis juga telah melaksanakan dua kali pengabdian masyarakat di Kecamatan Donomulyo, Kabupaten Malang. Dalam berkepanitiaan, penulis pernah menjabat sebagai koordinator (Co.) acara Campus Fair 2013, anggota acara AEE 2013, Co. Dana dan Usaha Inaugurasi TEP 2013, anggota konsumsi OB 2013, anggota acara UB HFC 2013, anggota acara Pengmas AGEENT 2013, anggota perlengkapan OPJ TEP, anggota acara / koordinator lapang BHFF 2014, anggota PDD AEE 2014, Ketua Pelaksana Campus Fair 2014, Co. acara HSD 2014, wakil Co. acara KB 2014, steering comitee (SC) Campus Fair 2015, anggota perlengkapan TO & UP HIMATETA 2015, anggota acara Sarasehan Jurusan TEP 2015, SC HSD 2015, dan SC WORE 2015. Dalam berorganisasi, penulis pernah menjabat sebagai Staff Magang AGEENT HIMATETA (2012 - 2013), Kepala Bidang SDM HIMNI 75 (2014 – 2015), Staff Bidang Research and Development AGEENT HIMATETA (2013 – 2014), Ketua Umum AGEENT HIMATETA (2014 – 2015), dan Ketua Umum HIMNI 75 (2015 – 2016).



“MMF”



**Keluarga Besar
Agricultural Engineering
Energy Team**



PH HIMATETA 2014 – 2015



PIONER Technology

Alhamdulillah,
Terimakasih Ya Allah, terimakasih telah dipertemukan dengan orang-orang luar biasa di kampus biru ini, terimakasih atas segala tangis dan tawa, terimakasih atas segala proses yang luar biasa, pengalaman yang tak terlupakan.

Karya ini saya persembahkan khususnya kepada kedua orang tua saya yang sangat luar biasa, juga kepada Mba Uti, Tika, dan semua teman-teman seperjuangan di kampus tercinta.

“Di belakang orang hebat banyak orang-orang hebat lain yang mendukungnya, izinkanlah saya menjadi salah satunya”

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Budi Satriyo
NIM : 125100601111017
Program Studi : Teknik Bioproses
Jurusan : Keteknikan Pertanian
Fakultas : Teknologi Pertanian
Judul TA : Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tipe
Axial Flow Underwater Turbine
Menggunakan *Diffuser* dengan Generator
Magnet Permanen Radial 3 Fasa 18s 12p
Blade Tip Power System

Menyatakan bahwa,

TA dengan judul di atas merupakan karya asli penulis tersebut di atas. Apabila di kemudian hari terbukti pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia dituntut sesuai hukum yang berlaku.

Malang, 26 Mei 2016
Pembuat pernyataan,

Budi Satriyo
NIM. 125100601111017

Budi Satriyo. 125100601111017. Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tipe *Axial Flow Underwater Turbine* Menggunakan *Diffuser* dengan Generator Magnet Permanen Radial 3 Fasa 18s 12p *Blade Tip Power System*. TA.

Pembimbing : 1. Dr. Ir. Bambang Dwi Argo, DEA.

2. Rini Yulianingsih, STP, MT.

Penguji : Dr. Ir. Anang Lastriyanto, M.Si

RINGKASAN

Air merupakan salah satu potensi sumber daya alam di Indonesia yang dapat dijadikan sumber energi alternatif. Namun, untuk memanfaatkannya dibutuhkan sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) yang hanya dapat beroperasi pada sumber air dengan spesifikasi tertentu, yang dimana terdapat banyak sumber air yang tidak memiliki spesifikasi tersebut. Selain itu, dibangunnya bendungan juga memerlukan biaya yang besar serta berpotensi merusak ekosistem. Salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan sistem *diffuser*. Berdasarkan penelitian, pembesaran sudut luasan *diffuser* sebesar 20° dapat meningkatkan kecepatan aliran air sebesar 1,96 kali lebih besar dibandingkan dengan tanpa menggunakan *diffuser* (Khuntongjan, 2012).

Pada tugas akhir ini dirancang sebuah pembangkit listrik tenaga air tanpa *head* dengan diameter saluran utama sebesar 17,8 cm dan dimensi total sebesar 34 x 34 x 35,3 cm. Pembangkit listrik ini didesain dengan menggunakan *diffuser* dan sistem pembangkitan listrik *blade tip power system*.

Berdasarkan hasil penelitian, diketahui kecepatan aliran air minimal alat sebesar 0,798 m/s dengan efisiensi tertinggi 22,9%. Tujuan dari perancangan alat ini adalah untuk menciptakan sebuah pembangkit listrik yang *portable*, *invisible*, dan *valuable* sehingga dapat memaksimalkan pemanfaatan air sebagai sumber energi tanpa merusak keindahannya serta membantu pemerintah dalam pemerataan pembangunan nasional ke seluruh pelosok negeri.

Kata Kunci : *blade tip power system*, *diffuser*, energi, generator, head

Budi Satriyo. 125100601111017. Novel Axial Flow Underwater Turbine Hydro Power Plant with Diffuser and 3 Phase 18s 12p Permanent Magnet Generator Blade Tip Power System. TA.

**Supervisor : 1. Dr. Ir. Bambang Dwi Argo, DEA.
2. Rini Yulianingsih, STP, MT.**

Examiner : Dr. Ir. Anang Lastriyanto, M.Si

SUMMARY

Water is the one of natural resource that potentially to be used as alternative energy resource. But, to use water resource takes some hydroelectric power generator that needs some river specification, one of the specification is head wich not all water source has. Moreover, this conventional hydroelectric power generator can ruin local ecosystem. The solution that can solve this problem is the use of a diffuser. Based on research, the use of a 20° diffuser can accelerate the water flow velocity up to 1,96 times faster than before.

In this final task was designed a zero head hydroelectric power generator with total dimension of 34 x 34 35,3 cm. This hydroelectric power generator designed with diffuser and blade tip power system.

Based on this research, known that the minimum water flow velocity about 0,798 m/s with 22,9% highest efficiency. The purpose of this design is to create a portable, invisible, and valuable hydroelectric power generator so that can maximize the utilization of water source as alternative energy resouce without ruin it beauty and help the government to equalize the national development programmes.

Key Words : blade tip power system, *diffuser*, energy, generator, head

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam penulis junjungkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini dengan baik.

Terselesainya Skripsi ini adalah berkat dukungan dari semua pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua Orang tua dan segenap keluarga yang telah memberikan dukungan moral serta materi.
2. Dr. Ir. Bambang Dwi Argo, DEA, selaku dosen pembimbing I.
3. Rini Yulianingsih, STP, MT., selaku dosen pembimbing II.
4. Dr. Ir. Anang Lastriyanto, M.Si., selaku dosen penguji
5. Dimas Firmada Al Riza, ST, M.Sc., yang telah membimbing penulis dalam perancangan alat pada Skripsi ini.
6. Ricky Elson, yang telah memberikan bimbingan, masukan, dan pengetahuan mengenai sistem generator yang digunakan pada Skripsi ini.
7. Tim PIONER, yang telah memberikan waktu, pikiran, dan tenaganya untuk membuat alat pada Skripsi ini.
8. Semua teman dan dosen Fakultas Teknologi Pertanian yang telah membant.

Penulis menyadari bahwa Skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena hal tersebut, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun untuk kesempurnaan Skripsi ini. Penulis berharap semoga Skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada semua pihak yang memerlukannya. Demikian yang dapat penulis sampaikan, atas kerjasamanya penulis mengucapkan terima kasih.

Malang, 26 Mei 2016

Penulis

DAFTAR ISI

RIWAYAT HIDUP	i
LEMBAR PERUNTUKAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
RINGKASAN	iv
SUMMARY	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Hipotesis	2
1.5 Manfaat Rancang Bangun	3
1.6 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Air	4
2.1.1 Energi Air	4
2.1.2 Potensi Sumber Energi Listrik Tenaga Air di Indonesia	4
2.2 Turbin	5
2.3 <i>Axial Flow Underwater Turbine</i>	6
2.4 Pengertian Daya	7
2.5 Generator	8
2.5.1 Pengertian Generator	8
2.5.2 Generator Magnet Permanen	9
2.5.3 Generator Fluks Radial	10
2.5.4 Generator 3 Fasa	10
2.5.5 Blade Tip Power System	12
2.6 <i>Diffuser</i>	13
2.6.1 Pengertian <i>Diffuser</i>	13

2.6.2 Pengaruh Bentuk <i>Diffuser</i> terhadap Kecepatan Aliran	15
2.6.3 Aplikasi <i>Diffuser</i> pada Sistem Pembangkit Listrik	16
2.7 Bilangan Reynolds	17

BAB III METODE PELAKSANAAN	19
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	19
3.2 Alat dan Bahan	19
3.2.1 Alat	19
3.2.2 Bahan	20
3.3 Metode Perancangan	17
3.3.1 Perancangan Fungsional	21
3.3.2 Perancangan Struktural	21
3.3.3 Perhitungan Desain	27
3.4 Metode Kalibrasi	29
3.5 Metode Pengujian	30
3.5.1 Mengukur Daya pada Variasi Kecepatan Putaran Turbin	30
3.5.2 Mengukur Tegangan <i>Open Circuit</i> dan Daya pada Variasi Kecepatan Aliran Air	31
3.5.3 Mengukur Kecepatan Aliran Air Minimal Alat	32
3.5.4 Mengukur Nilai Efisiensi Konversi Energi Alat	32
3.6 Parameter Pengamatan	27
3.6.1 Tegangan <i>Open Circuit</i>	33
3.6.2 Daya	33
3.6.3 Kecepatan Aliran Air Minimal Alat	33
3.6.4 Efisiensi Alat	33
3.7 Diagram Alir Penelitian	34

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Pembahasan Umum	36
4.2 Hasil Rancang Bangun	36
4.3 Hasil Kalibrasi Alat	37
4.4 Hasil Pengujian Alat	40
4.4.1 Pengaruh Kecepatan Putaran Turbin Terhadap Daya	40
4.4.2 Pengaruh Kecepatan Aliran Air Terhadap Tegangan <i>Open Circuit</i> Alat	43

4.4.3 Pengaruh Kecepatan Aliran Air Terhadap Daya.....	46
4.4.4 Kecepatan Aliran Air Minimal Alat.....	49
4.4.5 Perhitungan Efisiensi.....	52
4.5 Perbandingan Alat.....	53
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	 54
5.1 Kesimpulan.....	54
5.2 Saran.....	55
 DAFTAR PUSTAKA	 56
LAMPIRAN	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis Turbin.....	6
Tabel 2.2 Kombinasi <i>slots</i> dan <i>poles</i> pada generator 3 fasa.....	11
Tabel 3.1 Daya teoritis yang dihasilkan pada tiap kecepatan aliran air.....	27
Tabel 3.2 Spesifikasi generator.....	28
Tabel 3.3 Variabel yang diamati pada setiap perangkat pengujian.....	30
Tabel 4.1 Perbandingan pembangkit listrik tipe hidrokinetik.....	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Turbin impuls dan reaksi.....	6
Gambar 2.2 <i>Cappa+++ Hydroelectric Power Generator</i>	7
Gambar 2.3 Perbedaan generator fluks radial dengan aksial.....	10
Gambar 2.4 Perbedaan derajat elektrik pada masing-masing fasa.....	10
Gambar 2.5 Rangkaian <i>Delta</i> dan <i>Wye</i>	12
Gambar 2.6 Rangkaian penyearah 3 fasa.....	10
Gambar 2.7 Perbedaan sistem pembangkit listrik <i>blade tip power system</i>	13
Gambar 2.8 Hubungan antara tekanan dengan kecepatan aliran.....	14
Gambar 2.9 Pengaruh sudut terhadap tekanan statis dan kecepatan aliran.....	15
Gambar 2.10 Grafik pengaruh panjang <i>diffuser</i> terhadap rasio kenaikan kecepatan aliran.....	16
Gambar 2.11 Skema pengaplikasian <i>diffuser</i> pada turbin angin dan air.....	16
Gambar 2.12 Grafik perubahan energi yang dihasilkan dan rasionya terhadap waktu.....	17
Gambar 3.1 Desain pembangkit listrik tenaga air dilihat dari tampak depan, belakang, dan samping.....	22
Gambar 3.2 Dimensi saluran penyetabil.....	22
Gambar 3.3 Dimensi rumah turbin dan generator.....	23
Gambar 3.4 Dimensi turbin.....	24
Gambar 3.5 Desain generator.....	25
Gambar 3.6 Dimensi <i>diffuser</i>	26
Gambar 3.7 Dimensi keseluruhan alat pembangkit listrik tenaga air.....	26
Gambar 3.8 Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap daya.....	28
Gambar 3.9 Rangkaian Kalibrasi.....	29
Gambar 3.10 Rangkaian uji kecepatan putar menggunakan motor DC.....	31
Gambar 3.11 Rangkaian uji menggunakan alat uji model hidrolik fisik.....	32

Gambar 3.12	Diagram alir penelitian.....	35
Gambar 4.1	Hasil rancang bangun keseluruhan dan turbin.....	37
Gambar 4.2	Grafik pengaruh kecepatan putaran turbi terhadap nilai V_{oc} perhitungan dan pengujian.....	38
Gambar 4.3	Grafik pengaruh kecepatan putaran turbin Terhadap tegangan berbeban dan arus.....	41
Gambar 4.4	Grafik pengaruh kecepatan putaran turbin terhadap daya.....	42
Gambar 4.5	Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap nilai V_{oc}	44
Gambar 4.6	Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap kecepatan turbin hasil interpolasi.....	45
Gambar 4.7	Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap tegangan berbeban dan arus.....	47
Gambar 4.8	Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap daya.....	48
Gambar 4.9	Grafik perbandingan daya hasil perhitungan teoritis dengan daya hasil pengujian.....	50
Gambar 4.10	Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap efisiensi.....	52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Perhitungan desain generator.....	63
Lampiran 2	Hasil pengujian dengan menggunakan motor DC.....	65
Lampiran 3	Hasil pengujian dengan menggunakan saluran kalibrasi <i>currentmeter</i>	66
Lampiran 4	Surat permohonan penggunaan Laboratorium Balai Sungai.....	72
Lampiran 5	Dokumentasi kegiatan.....	73

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial di Indonesia adalah energi air dikarenakan 63% luas wilayahnya merupakan perairan (Purwaningsih, 2007). Dalam pemanfaatannya, untuk membangun sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dibutuhkan keberadaan *head* tertentu atau sebuah bendungan yang cukup besar untuk memanfaatkan energi yang ada. Namun, tidak semua sumber air memiliki spesifikasi tersebut sehingga mempersempit pemanfaatannya. Saat ini, terdapat berbagai teknologi pembangkit listrik skala kecil untuk menangani masalah tersebut, salah satunya adalah pikohidro. Pikohidro merupakan pembangkit listrik skala kecil dengan daya output hingga 500 Watt (Fela, 2013). Namun, pikohidro yang sudah ada saat ini tetap memerlukan bangunan khusus dengan *head* tertentu untuk dapat beroperasi. Adapun *Cappa+++ Hydroelectric Power Generator* yang menggunakan *diffuser* dan tidak memerlukan *head*, namun ukurannya masih relatif besar dan masih memerlukan bangunan khusus sehingga sulit untuk mobilisasi dan masih memerlukan bangunan khusus. Hal ini mengakibatkan banyaknya sungai-sungai kecil yang tidak dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik karena tidak sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan. Oleh karena hal tersebut, diperlukan sebuah inovasi pembangkit listrik yang dapat memanfaatkan sungai-sungai kecil untuk mengoptimalkan potensi energi air di Indonesia.

Pada tugas akhir ini dilakukan rancang bangun pembangkit listrik bertipe *axial flow underwater turbine* menggunakan *diffuser* dan mekanisme pembangkitan listrik *blade tip power system*. Penggunaan *diffuser* merupakan salah satu solusi untuk memanfaatkan aliran air dengan kecepatan rendah yang tidak memiliki *head* tanpa harus membuat bangunan khusus sehingga dapat memanfaatkan sungai-sungai kecil maupun saluran irigasi. *Diffuser* dapat mempercepat kecepatan aliran air yang melewatinya sehingga memungkinkan

daya yang dihasilkan oleh sistem pembangkit listrik akan semakin besar. Mekanisme *blade tip power system* sendiri digunakan untuk menghilangkan sistem transmisi sehingga efisiensi alat diharapkan semakin tinggi. Penggabungan kedua sistem tersebut belum pernah dilakukan pada pembangkit listrik manapun. Selain itu, inovasi pada bidang sistem pembangkit listrik tenaga air skala kecil juga masih relatif rendah dan kurang diperhatikan. Padahal potensinya cukup baik untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber energi terbarukan berbasis fluida. Dengan adanya alat ini diharapkan dapat mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya air di Indonesia serta membantu pemerataan pembangunan nasional ke seluruh pelosok negeri.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka didapatkan rumusan masalah sebagai berikut.

1. Berapakah daya yang dihasilkan alat pada kecepatan putaran turbin tertentu?
2. Berapakah kecepatan aliran air minimal yang dibutuhkan untuk memutar turbin?
3. Bagaimanakah daya yang dihasilkan alat pada kecepatan aliran air tertentu?
4. Bagaimanakah efisiensi daya yang dihasilkan alat?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang dan membangun alat pembangkit listrik tenaga air skala kecil dengan menggunakan *diffuser* dan *blade tip power system*.
2. Mengetahui tegangan *open circuit* dan daya yang dihasilkan alat pada kecepatan putaran turbin tertentu.
3. Mengetahui kecepatan aliran air yang dibutuhkan untuk memutar turbin.
4. Mengetahui tegangan *open circuit* dan daya yang dihasilkan alat pada kecepatan aliran air tertentu.

5. Mengetahui efisiensi daya yang dihasilkan alat.

1.4 Hipotesis

Berdasarkan dari tujuan penelitian dan berbagai literatur, didapatkan hipotesis sebagai berikut.

1. Semakin cepat kecepatan putar yang diberikan maka daya yang dihasilkan akan semakin besar.
2. Alat dapat menghasilkan listrik pada kecepatan aliran air rendah.
3. Semakin besar kecepatan aliran air maka daya yang dihasilkan akan semakin besar
4. Efisiensi daya yang dihasilkan oleh alat lebih besar dari pembangkit listrik serupa

1.5 Manfaat Rancang Bangun

Diharapkan alat yang dirancang dapat beroperasi secara efektif dan efisien sehingga dapat memaksimalkan pemanfaatan air sebagai pembangkit listrik tanpa harus merubah struktur sungai/saluran maupun membuat bangunan khusus. Dengan demikian, alat ini diharapkan dapat membantu program pemerintah dalam penyediaan energi serta pemerataan distribusi listrik di Indonesia.

1.6 Batasan Masalah

1. Pengujian alat hanya dilakukan dengan seperangkat alat uji.
2. Kecepatan aliran diujikan pada alat diatur secara konstan pada nilai tertentu.
3. Tidak membahas faktor ekonomi, faktor alam, pindah panas, dampak alat, sistem kelistrikan lain serta mekanisme perlindungan dan peletakan alat.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Air

2.1.1. Energi Air

Air merupakan sumber energi yang murah dan relatif mudah di dapat, karena pada air tersimpan energi potensial (air jatuh) dan kinetik (air mengalir). Energi yang dimiliki air dapat dimanfaatkan dan digunakan dalam wujud energi mekanis maupun energi listrik. Sejak abad ke-18 kincir air banyak dimanfaatkan sebagai penggerak penggilingan gandum, penggergajian kayu dan mesin (Sulistiyono, 2013). Untuk mengetahui energi potensial air dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Sulistiyono, 2013).

$$P = \rho.Q.g.H \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

P = daya (Watt)

H = tinggi air jatuh (m)

ρ = massa jenis (kg/m^3)

Q = debit (m^3/s)

g = gaya gravitasi (m/s^2)

Sedangkan untuk mengetahui energi kinetik air mengalir dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Pietersz, 2013).

$$P = \frac{1}{2} \rho.A.v^3 \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

P = daya (Watt)

A = luas penampang (m^2)

ρ = massa jenis (kg/m^3)

v = kecepatan aliran (m/s)

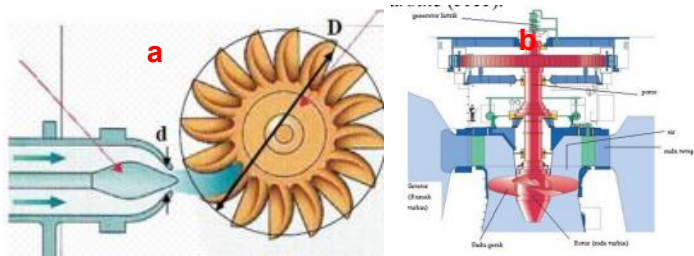
2.1.2. Potensi Sumber Energi Listrik Tenaga Air Indonesia

Air merupakan salah satu sumber energi alternatif yang memiliki densitas daya (*power density*) lebih besar daripada angin yaitu sebesar $7,8 \text{ kW/m}^2$ sedangkan angin sebesar $1,1 \text{ kW/m}^2$ (Mukherji, 2010). Indonesia sendiri merupakan negeri

yang kaya akan potensi sumber daya air. Negara ini memiliki sedikitnya 5.950 sungai utama dan 65.017 anak sungai dengan panjang total sungai utama mencapai 94.573 km serta luas Daerah Aliran Sungai (DAS) mencapai 1.512.466 km² (Panagan, 2011). Ironisnya, hingga tahun 2014 tercatat sekitar 12,5 juta keluarga belum dapat menikmati listrik (Dhany, 2014). Padahal, dengan jumlah sungai sebanyak itu Indonesia memiliki potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) sebesar 70.000 MW. Namun, potensi ini baru dimanfaatkan sekitar 6% atau sekitar 3.529 MW yang setara dengan 14,2 % dari jumlah energi pembangkitan PT PLN (Ratnata, 2013).

2.2. Turbin

Turbin merupakan bagian terpenting dari unit pembangkit listrik tenaga air yang merubah energi kinetik air menjadi gerak rotasi pada generator sehingga dapat menghasilkan listrik. Pemilihan turbin didasari pada karakteristik lokasi yang ingin dimanfaatkan. Berdasarkan beda tinggi (*head*), turbin dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu high head (>30 m), medium head (10 – 30 m), dan low head (<10 m) (Nugroho, 2015). Selain itu, turbin juga dibedakan berdasarkan cara kerjanya, yaitu turbin impuls dan reaksi. Turbin impuls merupakan jenis turbin yang bekerja karena aliran air, dalam hal ini beda tinggi diubah menjadi kecepatan pada nozel sehingga menumbuk sudu dan memutar turbin. Sedangkan turbin reaksi merupakan turbin yang bekerja karena adanya tekanan aliran air yang menimbulkan gaya tekan pada permukaan sudu-sudu turbin yang dimana pada umumnya turbin jenis ini sepenuhnya dibenamkan di dalam air (Situmorang, 2014). Perbedaan diantara kedua jenis turbin tersebut dapat dilihat pada **Gambar 2.1**. Turbin-turbin yang termasuk dalam klasifikasi jenis-jenis diatas dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.



Gambar 2.1 Turbin (a) impuls dan (b) reaksi
Sumber: (Situmorang, 2014)

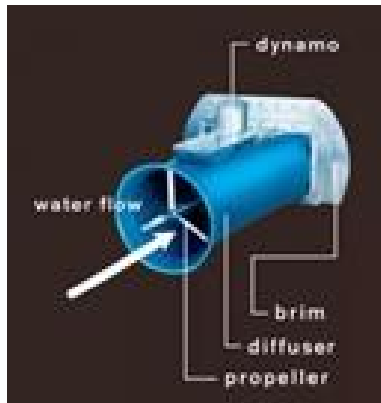
Tabel 2.1 Jenis turbin
Sumber: (Nugroho, 2015)

Jenis Turbin	High Head	Medium Head	Low Head
Turbin Impuls	Pelton Turgo	Crossflow Multi Jet Pelton Turgo	Crossflow
Turbin Reaksi	-	Francis	Propeller Kaplan

2.3. *Axial Flow Underwater Turbine*

Saat ini, para akademisi telah mengembangkan berbagai pembangkit listrik tenaga air dengan konsep *zero head*, salah satunya adalah *Axial Flow Underwater Turbine*. Pembangkit listrik jenis ini merupakan sebuah turbin reaksi tipe *propeller* yang dapat berputar secara paralel terhadap arus air yang datang dengan memanfaatkan gaya *drag* dan *lift* dari baling-baling (Opperman, 2011). Salah satu alat yang menggunakan konsep ini adalah *Cappa+++ Hydroelectric Power Generator* buatan Jepang seperti yang terlihat pada **Gambar 2.1**. Alat ini memiliki dimensi 83,2 cm × 77 cm × 66,5 cm dan berat 57 kg. Dengan spesifikasi tersebut, alat ini dapat beroperasi pada aliran air dengan kedalaman minimal 0,5 meter dan lebar 1,1 – 4,5 meter serta kecepatan aliran 1,5 – 2 m/s. Daya rata-rata yang dihasilkan oleh alat ini adalah sebesar 160 Watt pada kecepatan 1,75 m/s. Keunggulan dari alat ini terletak pada

komponen *diffuser* yang dapat mempercepat aliran air ketika melewati turbin (JETRO, 2013).



Gambar 2.2 Cappa+++ Hydroelectric Power Generator
Sumber: (JETRO, 2013)

2.4. Pengertian Daya

Daya merupakan energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan Watt atau *Horsepower* (HP). HP merupakan satuan daya listrik dimana 1 HP setara dengan 746 Watt. Sedangkan Watt merupakan unit daya listrik dimana 1 Watt memiliki daya setara dengan daya yang dihasilkan oleh perkalian antara arus 1 Ampere dengan tegangan 1 Volt (Suryanto, 2011).

$$P = V.I \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

P = daya (Watt)

V = tegangan (Volt)

I = arus (A)

2.5. Generator

2.5.1. Pengertian Generator

Generator adalah suatu alat atau mesin yang dapat merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik sendiri berasal dari energi potensial dan energi kinetik yang akan menggerakkan rotor melalui poros penghubung pada generator (Indriani, 2015). Prinsip kerja generator dalam mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik adalah berdasarkan hukum Faraday. Hasil penelitian Faraday menunjukkan bahwa apabila seutas kawat atau kumparan konduktor berada dalam medan magnet yang berubah terhadap waktu, maka pada ujung-ujungnya akan timbul tegangan atau gaya gerak listrik (ggl) induksi (Nurtjahjomulyo, 2010). Untuk mengetahui tegangan yang terinduksi pada generator dapat dihitung dengan persamaan berikut (Indriani, 2015).

$$E_{ph} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_{ph} \cdot k_w \cdot k_s \cdot \phi_{max} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

E_{ph} = tegangan Induksi pada tiap fasa (Volt)

N_{ph} = jumlah lilitan tiap kumparan

F = frekuensi (Hz)

Φ_{max} = fluks magnet maksimal (Wb)

K_w = faktor lilit (1)

K_s = faktor kemiringan (0,984)

Untuk mengetahui jumlah putaran dari generator dapat dihitung dengan rumus berikut (Indriani, 2015).

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

n = putaran (rpm)

f = frekuensi (Hz)

p = jumlah kutub

Untuk menghitung fluks magnet maksimal dapat digunakan persamaan berikut (Indriani, 2015).

$$\phi_{\max} = A_{\text{mag}} \cdot B_{\max} \dots\dots\dots (6)$$

Dimana:

$$B_{\max} = Br \cdot \frac{lm}{lm + \delta} \dots\dots\dots (7)$$

$$A_{\text{mag}} = \frac{\pi(r_0^2 - r_i^2) - \pi(r_0 - r_i)Nm}{Nm} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

- | | |
|---|-----------------------------|
| A_{mag} = luasan magnet (m^2) | Nm = jumlah magnet |
| r_0 = jari-jari luar (m) | lm = panjang magnet (m) |
| Br = kerapatan flux magnet (T) | r_i = jari-jari dalam (m) |
| π = jarak antar magnet (m) | |
| δ = jarak rotor dengan stator (m) | |
| B_{\max} = kerapatan fluks magnet maksimal (T) | |

Untuk menghitung besar arus yang terinduksi pada kumparan adalah sebagai berikut (Pramono, 2015).

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi} \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

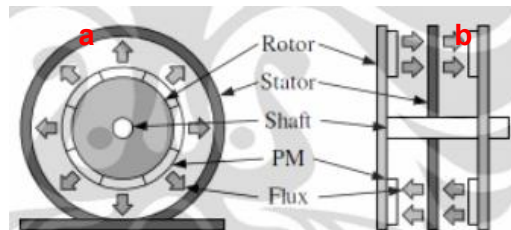
- | | |
|--------------------------------|--------------------|
| I = arus yang terinduksi (A) | V = tegangan (V) |
| P = daya (Watt) | |

2.5.2. Generator Magnet Permanen

Generator magnet permanen adalah generator dengan magnet permanen pada sisi rotor sebagai sumber energi eksitasi / fluks magnetik (Terimananda, 2016). Jenis generator ini dinilai sangat efisien karena mampu bekerja baik pada kecepatan putar yang rendah (Asy'ari, 2012).

2.5.3. Generator Fluks Radial

Generator flux radial merupakan generator sinkron yang dimana medan magnet memberikan arah radial dengan menempatkan rotor di tengah stator. Pada generator ini, magnet ditempatkan di ujung-ujung rotor (Putra, 2014). Perbedaan antara generator fluks radial dan aksial adalah seperti yang terlihat pada **Gambar 2.2**.

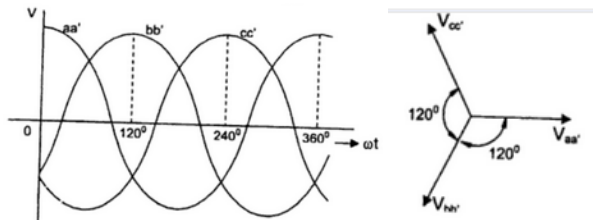


Gambar 2.3 Perbedaan generator flux (a) radial dengan (b) aksial

Sumber: (Prisandi, 2011)

2.5.4. Generator 3 Fasa

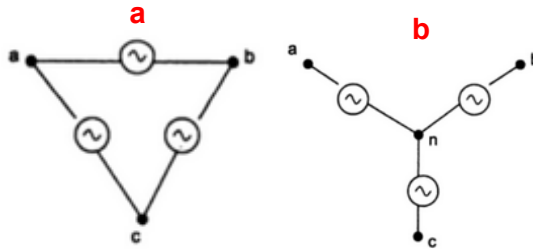
Elemen dasar generator 3 fasa terdiri atas magnet yang berputar dan kumparan stasioner yang disusun sedemikian rupa sehingga masing-masing susunan kumparan (fasa) menghasilkan beda tegangan sebesar 120° elektrik (Zuhal, 2004). Perbedaan tegangan pada tiap fasa adalah seperti yang terlihat pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.4 Perbedaan derajat elektrik pada masing-masing fasa

Sumber: (Zuhal, 2004)

Untuk membuat generator 3 fasa terdapat 2 jenis rangkaian, yaitu rangkaian delta (Δ) dan rangkaian wye (Y) seperti yang terlihat pada **Gambar 2.4**.



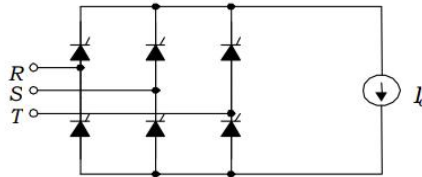
Gambar 2.5 Rangkaian (a) Delta dan (b) Wye
Sumber: (Zuhal, 2004)

Untuk menentukan kombinasi jumlah kumparan (*slots*) dan kutub (*poles*) pada generator 3 fasa adalah seperti yang terlihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.2 Kombinasi *slots* dan *poles* pada generator 3 fasa
Sumber: (Wang, 2005)

Jumlah poles (p)	Jumlah slots (s)
1	3
2	3, 6
3	9
4	6, 9, 12
5	9, 12, 15
6	9, 18
7	12, 15, 21
8	12, 15, 18, 24
9	27
10	18, 21, 24, 30
11	21, 24, 33
12	18, 27, 36
13	24, 27, 36
14	24, 24, 30, 42
15	27, 36, 45

Dalam pengaplikasiannya, rangkaian generator 3 fasa memerlukan penyearah untuk mengubah arus AC menjadi DC agar dapat digunakan pada rangkaian kontrol. Rangkaian penyearah untuk generator 3 fasa adalah seperti yang terlihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.5 Rangkaian penyearah 3 fasa
Sumber: (Abdillah, 2008)

2.5.5. *Blade Tip Power System*

Blade Tip Power System merupakan suatu sistem dimana magnet dan kumparan berada di ujung-ujung turbin sehingga turbin berfungsi ganda, yaitu sebagai pengubah gerak linier air menjadi gerak rotasi sekaligus sebagai rotor pada generator. Penggunaan sistem ini dapat mengurangi hambatan mekanik akibat transmisi sehingga efisiensi pembangkitan listrik akan semakin tinggi. Sistem seperti ini telah diaplikasikan pada *Honeywell Wind Turbine* yang dimana pada alat tersebut turbin langsung berputar di dalam sirkuit magnet dan stator sehingga dapat menghilangkan sistem transmisi mekanik dan menghasilkan listrik pada kecepatan angin rendah (Alymov, 2012). Perbedaan sistem pembangkit listrik tenaga angin konvensional dengan blade tip power system adalah seperti yang terdapat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.7 Perbedaan sistem pembangkit listrik *blade tip power system*

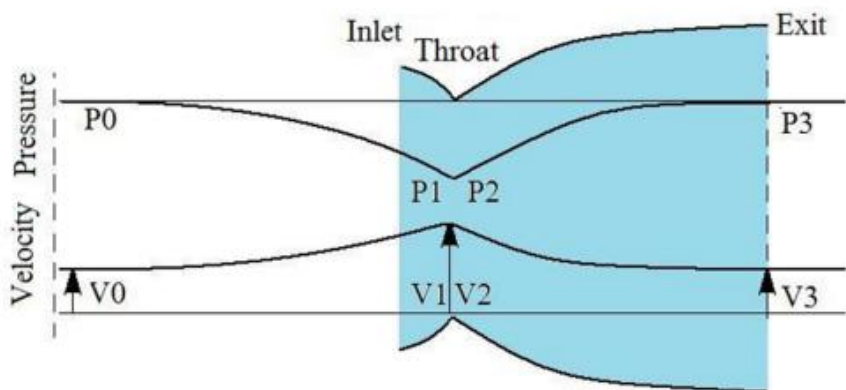
Sumber: (WindTronics, 2010)

2.6. Diffuser

2.6.1 Pengertian Diffuser

Berdasarkan **persamaan 2** dapat diketahui bahwa kecepatan aliran air dipangkatkan 3 yang artinya perubahan variabel tersebut sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan. Oleh karena hal tersebut, mempercepat kecepatan aliran fluida dinilai lebih efektif untuk meningkatkan daya pada sistem pembangkit listrik dibandingkan dengan memperbesar diameter turbin. Salah satu metode untuk meningkatkan kecepatan aliran fluida adalah dengan menggunakan saluran *diffuser* (Matsushima, 2005). *Diffuser* merupakan sebuah

saluran tertutup yang mengalirkan aliran fluida dari suatu area ke area yang lebih luas sehingga menurunkan tekanan statis di dalamnya (Priyadarshan, 2010). Adanya tekanan statis ini memudahkan aliran air untuk menuju saluran sehingga meningkatkan kecepatan aliran air di depannya (Nishi, 2014). Hubungan antara tekanan dengan kecepatan aliran fluida di dalam diffuser adalah seperti yang terdapat pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.8 Hubungan antara tekanan dengan kecepatan aliran
Sumber: (Khunthongjan, 2012)

Dalam aplikasinya, saluran *diffuser* sendiri mengikuti persamaan Bernauli sebagai berikut (Khuntongjan, 2012).

$$P_{tot} = P_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_3 + \frac{1}{2} \rho V_3^2 \dots\dots\dots(10)$$

$$V_1 = \beta V_3 \dots\dots\dots(11)$$

$$V_1 = \gamma W_0 \dots\dots\dots(12)$$

- Keterangan:
- P_{tot} = Tekanan total (Pa)
 - P_i = Tekanan pada lokasi i (Pa)
 - V_i = Kecepatan pada lokasi i (Pa)

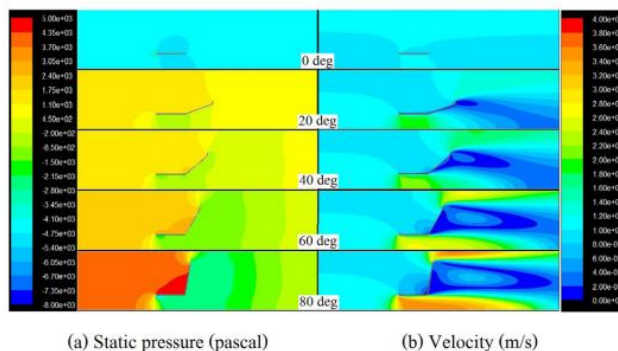
ρ = Densitas fluida (kg/m^3)

β = Rasio luasan *diffuser*

γ = rasio antara tekanan dengan kecepatan

2.6.2 Pengaruh Bentuk *Diffuser* terhadap Kecepatan Aliran

Salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan *diffuser* adalah sudut kemiringannya. Menurut penelitian, penambahan sudut kemiringan pada penampang *diffuser* berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan aliran yang melewatinya. Kenaikan kecepatan aliran paling besar terjadi diantara sudut 0° dan 50° dengan perubahan kecepatan pada sudut 20° hingga 1,96 kali lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan *diffuser* seperti yang terdapat pada **Gambar 2.8** (Khunthongjan, 2012).

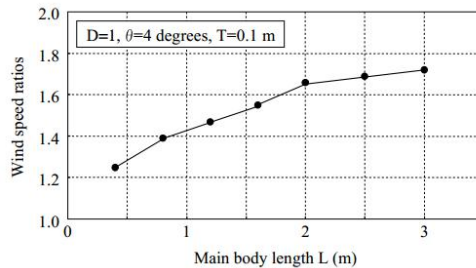


Gambar 2.9 Pengaruh sudut terhadap tekanan statis dan kecepatan aliran

Sumber: (Khunthongjan, 2012)

Selain sudut kemiringan *diffuser*, menurut penelitian yang telah dilakukan Matsushima (2005) diketahui bahwa panjang saluran *diffuser* juga dapat mempengaruhi kecepatan aliran fluida yang melewatinya. Berdasarkan penelitian tersebut dapat diketahui bahwa semakin panjang saluran *diffuser* yang digunakan maka percepatan aliran angin akan semakin tinggi, sehingga dapat dikatakan panjang saluran *diffuser* berbanding

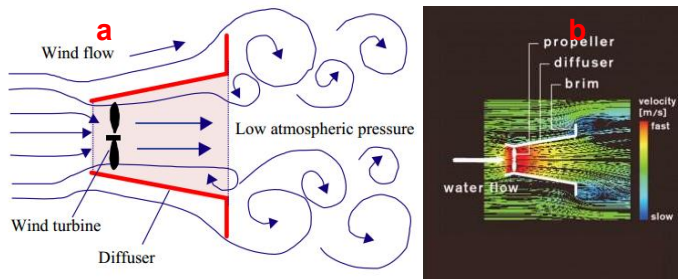
lurus dengan percepatan aliran fluida yang melewatinya seperti yang terlihat pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.10 Grafik pengaruh panjang saluran *diffuser* terhadap rasio kenaikan kecepatan aliran
Sumber: (Matsushima, 2005)

2.6.3 Aplikasi *Diffuser* pada Sistem Pembangkit Listrik

Saat ini, *diffuser* telah digunakan pada sistem pembangkitan listrik yang berbasis fluida seperti turbin angin maupun turbin air dengan skema seperti pada **Gambar 2.10**.

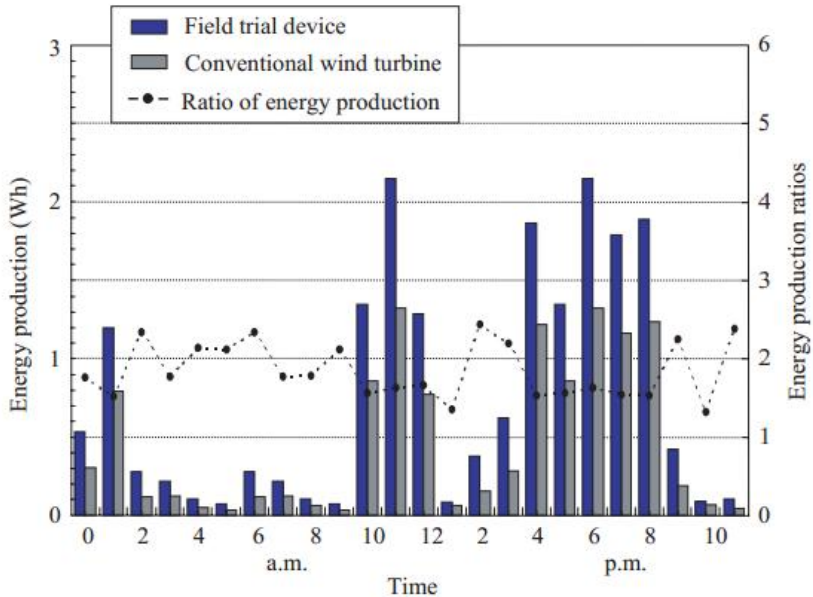


Gambar 2.11 Skema aplikasi *diffuser* pada turbin (a) angin dan (b) air

Sumber: (Matsushima, 2005 dan JETRO, 2013)

Hal tersebut dikarenakan *diffuser* dapat meningkatkan kecepatan aliran fluida yang melewati turbin, sehingga daya yang dihasilkan akan semakin besar. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Matsushima (2005), dapat diketahui

bahwa energi yang dihasilkan oleh turbin angin berdiffuser lebih banyak dibandingkan dengan yang tidak menggunakan *diffuser* seperti yang terlihat pada grafik **Gambar 2.11**.



Gambar 2.12 Grafik perubahan energi yang dihasilkan dan rasionya terhadap waktu
Sumber: (Matsushima, 2005)

2.7. Bilangan Reynolds

Dalam mekanika fluida, bilangan Reynolds (Re) merupakan perbandingan antara gaya inersia ($\rho v d$) terhadap gaya viskositas / viskositas dinamik fluida (μ) yang mengkuantifikasi hubungan gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu (Hapsoro, 2013). Yilmaz (1982) menyatakan bahwa bilangan Reynolds dapat mempengaruhi penurunan tekanan, sehingga menyebabkan aliran menjadi turbulen. Suatu aliran dapat dikatakan laminar apabila memiliki nilai $Re < 2000$, transisi $2000 < Re < 4000$, sedangkan turbulen $Re > 4000$ (Hapsoro, 2013). Untuk menghitung bilangan Reynolds dapat

dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Hapsoro, 2013).

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{V d}{\nu} \dots\dots\dots(13)$$

Keterangan:

Re = bilangan Reynolds

ρ = massa jenis fluida (kg/m³)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

D = diameter dalam saluran (m)

μ = viskositas dinamik fluida (kg/ms)

ν = viskositas kinematik fluida (m²/s)

III. METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Dalam penelitian ini, pembuatan alat dilakukan di *PPPPTK VEDC* Malang dan *CV Lastrindo Engineering*. Untuk kegiatan pengujian alat sendiri dilakukan di Laboratorium Daya dan Mesin Pertanian Jurusan Keteknikan Pertanian FTP UB dan Laboratorium Model Fisik Balai Sungai Puslitbang SDA Balitbang Kementerian PU. Tugas akhir ini akan dilaksanakan pada bulan Februari hingga April 2016.

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

a. Alat Pembuatan

Alat yang digunakan untuk membuat alat adalah sebagai berikut.

1. Jangka sorong : mengukur diameter bahan
2. Meteran : mengukur panjang bahan
3. Pemotong plat : memotong plat *stainless steel* dan aluminium
4. Mesin bor : melubangi bahan
5. Mesin las listrik : menyambung bagian-bagian alat
6. Mesin gerinda : memotong bahan
7. Busur : mengukur sudut diffuser dan kumparan
8. Mesin *roll* : membentuk plat menjadi bentuk silinder
9. *Printer 3D* : membuat turbin
10. *Solder* : menyambungkan kabel dan kawat tembaga
11. Alat lilit dynamo : membuat lilitan pada kumparan

b. Alat Pengujian

Alat yang digunakan dalam proses pengujian alat adalah sebagai berikut.

1. Multimeter : mengukur nilai tegangan dan arus yang dihasilkan
2. Potensiometer : sebagai beban
3. Dioda penyearah 1A : sebagai penyearah arus AC

4. Motor DC Toshiba DGM-3522-2A : menguji alat pada kecepatan putaran tertentu
5. *Power Supply switching 24 V 10 A* : untuk mengatur kecepatan motor DC
6. *Laser Tachometer* : mengukur kecepatan putaran turbin
7. Saluran kalibrasi *currentmeter* : menguji daya yang dihasilkan alat pada kecepatan aliran air tertentu

3.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan pada pembuatan alat adalah sebagai berikut.

1. Plat *stainless steel* 304 2 mm : sebagai bahan penyusun rangka
2. Plat aluminium 1 mm : sebagai pengunci magnet pada turbin
3. Plastik PLA : sebagai bahan penyusun turbin
4. *Seal water* pompa : sebagai permukaan gesek di belakang turbin
5. Pengunci : sebagai pengunci *diffuser* dengan saluran penyearah
6. Kawat tembaga 5 mm : sebagai material lilitan kumparan
7. Kabel : sebagai media transmisi daya
8. Kawat timah : sebagai penyambung kabel dan tembaga
9. Lem besi *Dextone* : sebagai penyambung kumparan
10. Magnet *neodymium* N35 : sebagai pemberi fluks magnetic pada generator
11. Trafo CT 2A : sebagai inti besi kumparan
12. Resin : sebagai pelapis turbin dan kumparan
13. *Bosh* : sebagai permukaan gesek pada poros turbin
14. *Snap ring* : sebagai pengunci turbin
15. Pakan las *stainless steel* : sebagai penyambung stainless
16. Pakan las aluminium : sebagai penyambung aluminium

3.3. Metode Perancangan

3.3.1. Perancangan Fungsional

Alat pembangkit listrik tenaga air pada tugas akhir ini dirancang untuk dapat beroperasi pada saluran air kecil dengan tanpa membuat bangunan khusus serta merusak struktur dari saluran yang digunakan. Oleh karena hal tersebut, alat ini menggunakan turbin tipe *axial flow underwater turbine* dengan sistem generator magnet permanen radial 3 fasa 18s 12p *blade tip power system*. Berdasarkan hal-hal yang telah disebutkan, ditentukan bagian-bagian fungsional dari alat ini adalah sebagai berikut.

a. Saluran penyetabil

Sebagai penyetabil aliran air yang melewati turbin sehingga dapat memaksimalkan arah kontak air terhadap turbin.

b. Rumah turbin dan generator

Sebagai tempat untuk menopang turbin sekaligus kumparan generator.

c. Turbin

Sebagai pengkonversi gerak linier air menjadi gerak rotasi. Di ujung-ujung turbin ini akan terpasang magnet sebagai sumber fluks magnetik pada generator.

d. Generator

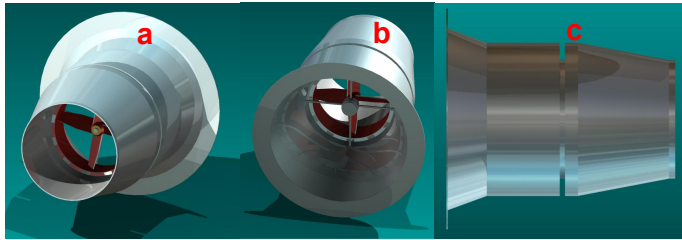
Sebagai penghasil daya ketika turbin berputar.

e. Diffuser

Sebagai komponen untuk mempercepat kecepatan aliran air pada turbin.

3.3.2. Perancangan Struktural

Alat pada tugas akhir ini didesain dengan menggunakan *Autodesk Inventor Professional 2015 Student Version* dengan hasil seperti yang terlihat pada **Gambar 3.1**. Alat ini dirancang sebagai penerapan dari studi literatur yang telah dilakukan.

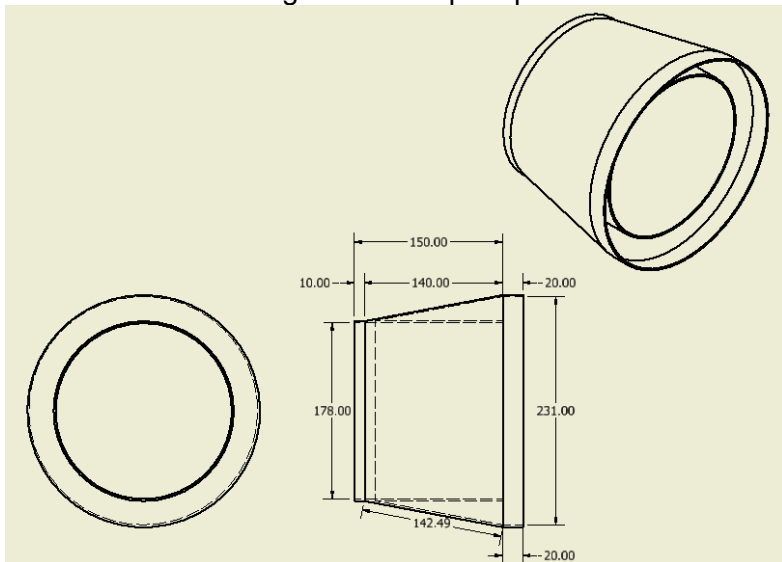


Gambar 3.1 Desain pembangkit listrik tenaga air dilihat dari tampak (a) depan, (b) belakang, dan (c) samping

Perancangan secara struktural ini dilakukan berdasarkan dari perancangan secara fungsional yang telah dibahas sebelumnya. Rancangan desain dari alat ini adalah sebagai berikut.

a. Saluran penyetabil

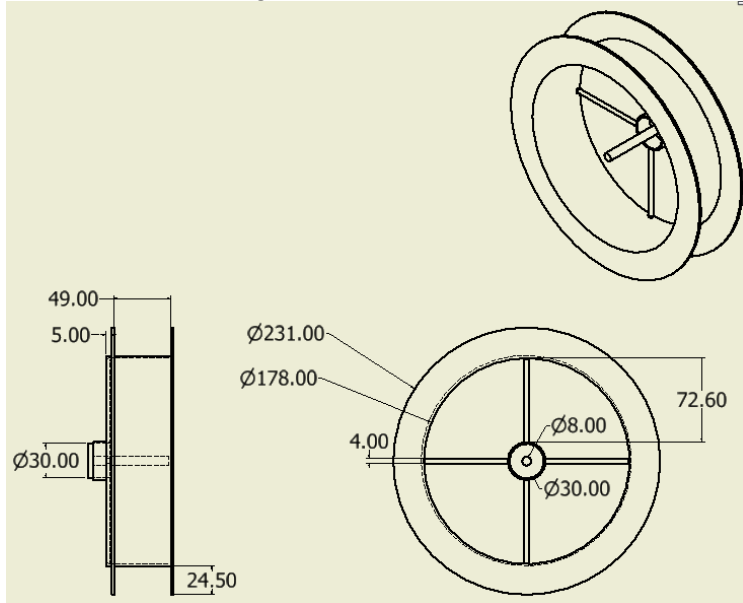
Saluran penyetabil didesain dengan diameter awal sebesar 17,8 cm, diameter akhir 23,1 cm dan panjang keseluruhan 17 cm dengan detail seperti pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Dimensi saluran penyetabil

b. Rumah turbin dan generator

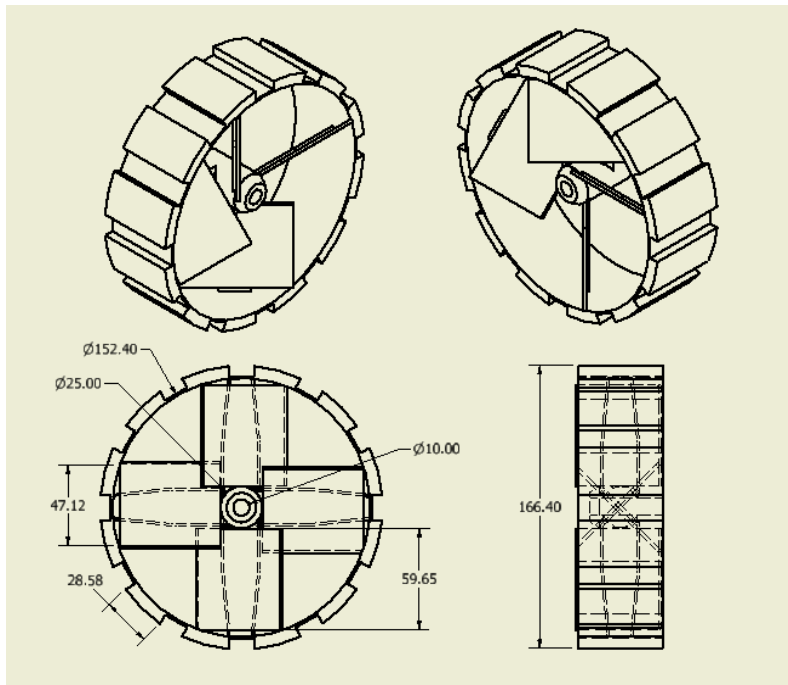
Komponen ini didesain dengan diameter dalam sebesar 17,8 cm dan diameter luar 23,1 cm. Pada tengah komponen terdapat dudukan rotor yang terbuat dari besi silinder berdiameter 8 mm dengan detail seperti pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Dimensi rumah turbin dan generator

c. Turbin

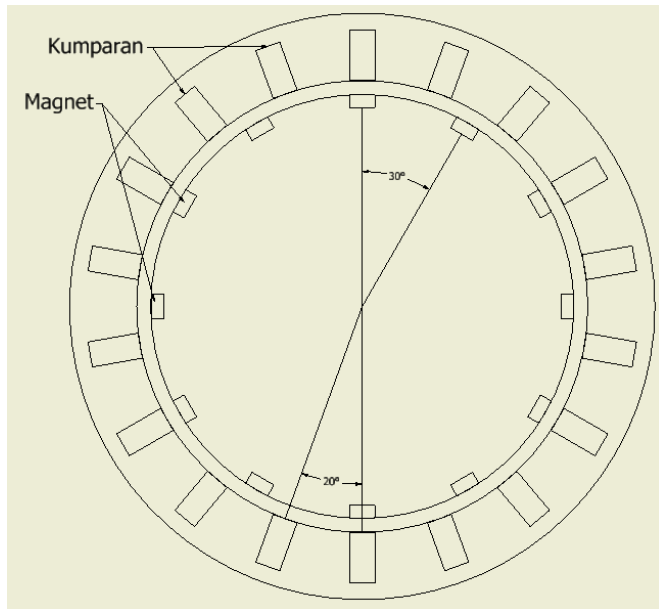
Komponen ini berbahan dasar plastik ABS yang dibuat dengan menggunakan *printer 3D*. Dimensi dari turbin yang digunakan adalah seperti pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4 Dimensi turbin

d. Generator

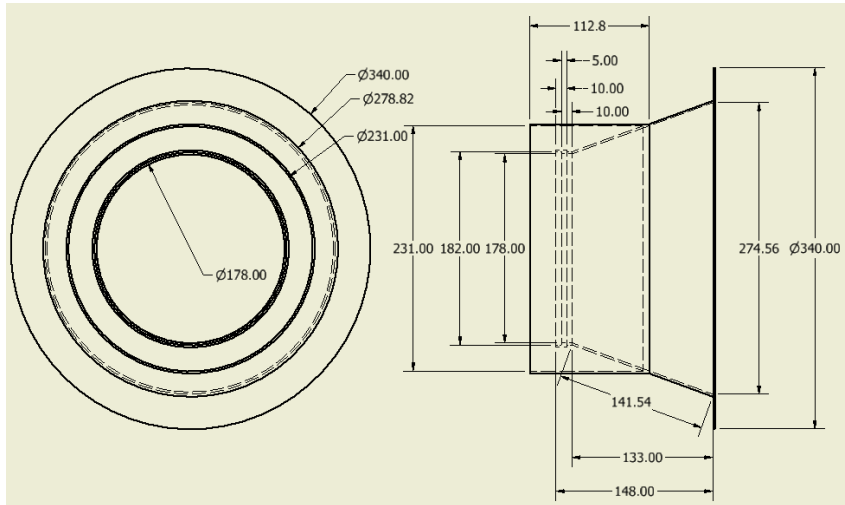
Generator yang digunakan bertipe radial 3 fasa 18s 12p yang artinya menggunakan sistem rangkaian 3 fasa serta memiliki 18 *slots* (kumparan) dan 12 *poles* (magnet). Pada generator ini, jarak antar kumparan adalah sebesar 20° dan jarak antar magnet adalah sebesar 30° seperti pada **Gambar 3.5**. Rangkaian 3 fasa yang digunakan pada generator ini adalah tipe wye (Y) seperti yang terdapat pada **Gambar 2.4 b**. Dimensi magnet yang digunakan adalah sebesar $5 \times 1 \times 0,5$ cm dengan kuat fluks 1,15 T.



Gambar 3.5 Desain generator

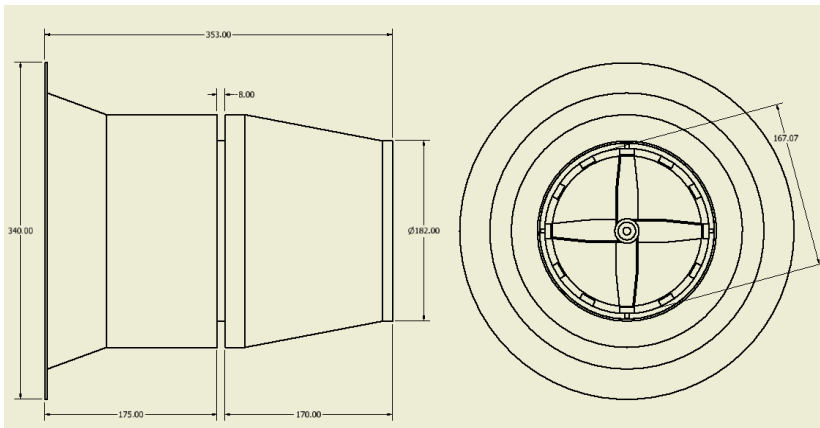
e. Diffuser

Komponen ini didesain dengan diameter awal 17,8 cm dan diameter akhir 27,45 cm (1 : 1,5) dengan sudut pembesaran sebesar 20° dengan detail seperti pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3.6 Dimensi diffuser

Berdasarkan pada perancangan struktural diatas maka dapat diketahui dimensi keseluruhan alat pembangkit listrik tenaga air yang dibuat adalah seperti yang terdapat pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3.7 Dimensi keseluruhan alat pembangkit listrik tenaga air

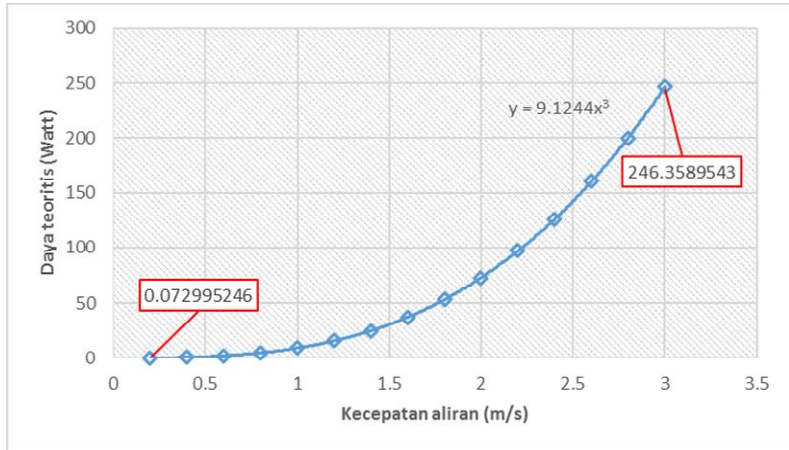
3.3.3. Perhitungan Desain

a. Perhitungan Daya

Berdasarkan desain yang telah disampaikan diatas, maka dapat dihitung daya air yang mengalir melewati turbin dengan **persamaan 2** adalah seperti yang terdapat pada **Tabel 3.1** dengan grafik pada **Gambar 3.8**.

Tabel 3.1 Daya teoritis yang dihasilkan pada tiap kecepatan aliran air

v air (m/s)	Daya (Watt)
0.2	0.072995246
0.4	0.583961966
0.6	1.970871634
0.8	4.671695726
1	9.124405714
1.2	15.76697307
1.4	25.03736928
1.6	37.37356581
1.8	53.21353413
2	72.99524571
2.2	97.15667205
2.4	126.1357846
2.6	160.3705548
2.8	200.2989542
3	246.3589543



Gambar 3.8 Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap daya

b. Perhitungan Generator

Alat pembangkit listrik tenaga air pada tugas akhir ini menggunakan generator *blade tip power system* yang disesuaikan dengan kapasitas alat. Oleh karena hal tersebut, generator didesain khusus dengan spesifikasi seperti yang terdapat pada **Tabel 3.2**.

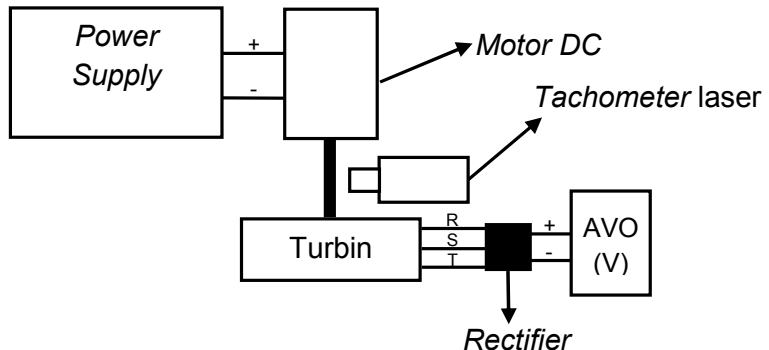
Tabel 3.2 Spesifikasi Generator

Variabel	Nilai
Daya maksimal (P)	300 Watt
Putaran (n)	300 rpm
Jumlah fase (Nph)	3
Jumlah magnet (Nm)	12
Jumlah kumparan (Ns)	18
Jumlah lilitan (N)	500
Diameter kawat tembaga	0,5 mm
Jarak rotor dengan stator (δ)	5 mm
Jarak antar magnet (T_f)	3,5 cm
Jari-jari terluar rotor (r_o)	16,7 cm
Jari-jari dalam (r_i)	15,5 cm

Berdasarkan spesifikasi pada **tabel 3.2** dapat dihitung nilai frekuensi dengan menggunakan **persamaan 5** sebesar 30 Hz, nilai tegangan yang dibangkitkan menggunakan **persamaan 4** sebesar 139,09 V dan arus (*root mean square*) yang terinduksi menggunakan **persamaan 9** sebesar 1,245 A. Untuk detail perhitungan terlampir pada **Lampiran 1**.

3.4. Metode Kalibrasi

Tahap kalibrasi pada tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar tegangan *open circuit* yang dihasilkan alat pada kecepatan putaran turbin tertentu. Kalibrasi ini dilakukan dengan cara memutar turbin menggunakan menggunakan *motor DC* Toshiba DGM-3522-2A pada variasi kecepatan putaran sebesar 50, 100, 150, 200, 250, dan 300 rpm. Rangkaian alat kalibrasi yang dilakukan adalah seperti pada **Gambar 3.9**. Selanjutnya, data yang didapatkan pada tahap ini akan dibandingkan dengan hasil perhitungan untuk diketahui besar perbedaannya. Selain itu, data hasil kalibrasi ini juga digunakan untuk menentukan kecepatan putaran turbin pada saat pengujian kecepatan aliran dengan metode interpolasi.



Gambar 3.9. Rangkaian Kalibrasi

3.5. Metode Pengujian

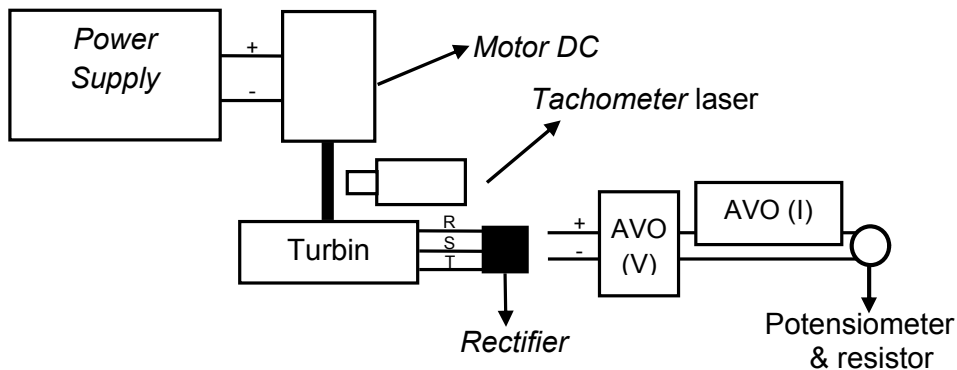
Berdasarkan alat uji yang digunakan, pengujian alat pada tugas akhir ini dibagi menjadi 2 bagian, yaitu pengujian dengan menggunakan motor *DC* Toshiba DGM-3522-2A dan saluran kalibrasi *currentmeter* dengan variabel pengamatan masing-masing seperti pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Variabel yang diamati pada setiap perangkat pengujian

Perangkat pengujian utama	Variabel yang diamati
Motor DC Toshiba DGM-3522-2A	Daya
Saluran kalibrasi <i>currentmeter</i>	Tegangan <i>Open Circuit</i> (V_{oc})
	Daya
	Kecepatan air minimal
	Efisiensi

3.5.1. Mengukur Daya pada Variasi Kecepatan Putaran Turbin

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *motor DC* Toshiba DGM-3522-2A sebagai penggerak turbin, *Power Supply switching* 24 V 10 A sebagai sumber listrik dan pengontrol kecepatan motor, *tachometer laser* sebagai pengukur kecepatan putar, 2 buah multimeter sebagai pengukur daya, potensiometer sebagai beban dan *rectifier* gelombang penuh untuk mengubah arus AC generator menjadi arus DC. Rangkaian pengujian pada tahap ini dapat dilihat pada **Gambar 3.10**.

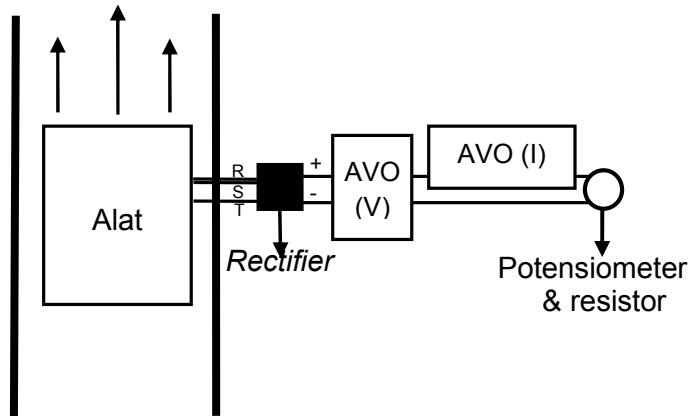


Gambar 3.10 Rangkaian uji kecepatan putar menggunakan motor DC

Pada pengujian tahap ini turbin akan diputar dengan variasi kecepatan putaran sebesar 50, 100, 150, 200, 250, dan 300 rpm yang digerakan dengan motor DC dan diatur dengan *power supply*. Selanjutnya, daya yang dihasilkan oleh turbin akan disearahkan menggunakan *rectifier* dan terbaca nilai tegangan dan arusnya oleh multimeter dengan potensiometer sebagai beban.

3.5.2. Mengukur Tegangan *Open Circuit* dan Daya pada Variasi Kecepatan Aliran Air

Pengujian pada tahap ini dilakukan dengan menggunakan saluran kalibrasi *currentmeter* sebagai simulasi aliran air sebagai kecepatan, *rectifier*, 2 buah multimeter, dan potensiometer. Rangkaian uji pada tahap ini seperti yang terlihat pada **Gambar 3.11**.



Gambar 3.11 Rangkaian uji menggunakan saluran kalibrasi *currentmeter*

Tahap pengujian ini dilakukan dengan menggerakkan alat dengan kereta bermotor berkecepatan 0,6-2.6 m/s. Pada pengoperasiannya, kecepatan motor diatur dari tingkatan terendah hingga tertinggi, kemudian dari masing-masing tingkatan tersebut dihitung waktunya dalam menempuh jarak sepanjang 30 m sehingga didapatkan kecepatan kereta yang sama dengan kecepatan aliran air. Dengan pengujian ini nantinya dapat diketahui pengaruh kecepatan aliran air terhadap tegangan *open circuit* dan daya yang dihasilkan.

3.5.3. Mengukur Kecepatan Aliran Air Minimal Alat

Alat-alat dan rangkaian yang digunakan pada tahap ini sama seperti pada tahap sebelumnya. Pada tahap ini akan diamati pada kecepatan air berapa turbin mulai berputar dan menghasilkan listrik, sehingga akan didapatkan kecepatan aliran air minimal alat untuk dapat beroperasi.

3.5.4. Mengukur Nilai Efisiensi Konversi Energi Alat

Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan efisiensi alat berdasarkan data-data hasil pengujian dan hasil perhitungan.

Nilai efisiensi alat dapat dihitung dengan menggunakan rumus pada **persamaan 14**.

$$Efisiensi = \frac{P_{real}}{P_{teoritis}} \cdot 100\% \dots\dots\dots(14)$$

Keterangan:

P_{real} = Daya yang dihasilkan alat melalui pengujian langsung (Watt)

$P_{teoritis}$ = Daya yang dihasilkan berdasarkan perhitungan secara teoritis (Watt)

3.6. Parameter Pengamatan

3.6.1. Tegangan *Open Circuit*

Tegangan *open circuit* merupakan tegangan yang terinduksi pada kumparan tanpa adanya pembebanan.

3.6.2. Daya

Daya merupakan energi yang dihasilkan oleh alat. Persamaan untuk menghitung daya adalah seperti yang terdapat pada **persamaan 3**.

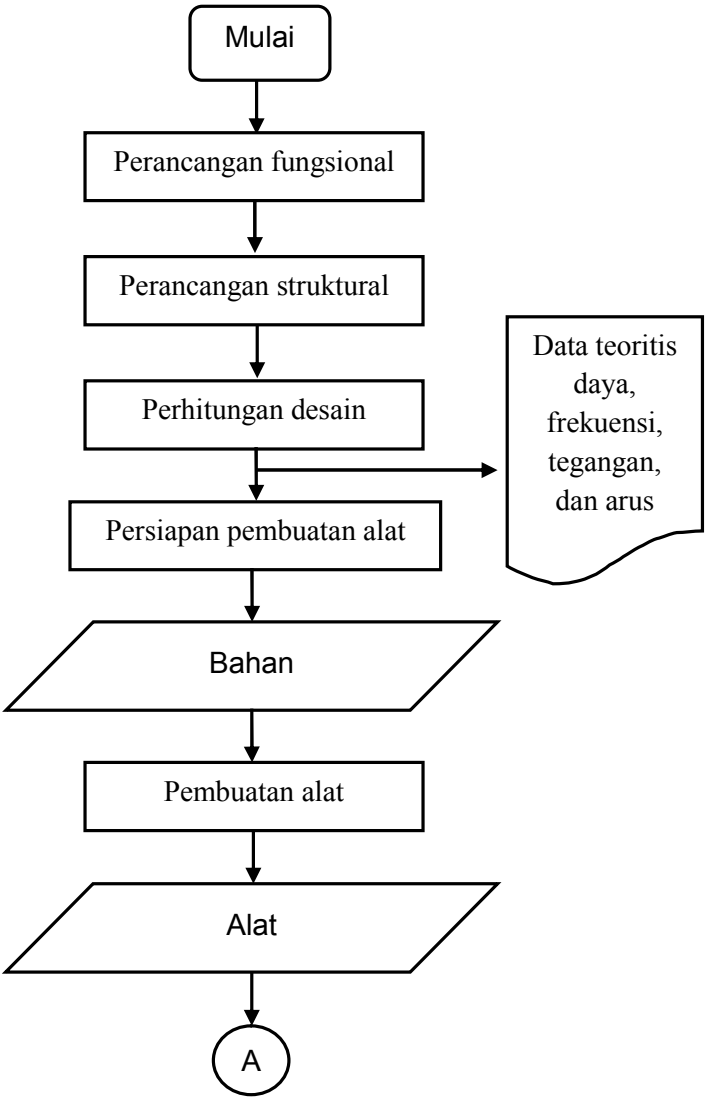
3.6.3. Kecepatan Aliran Air Minimal Alat

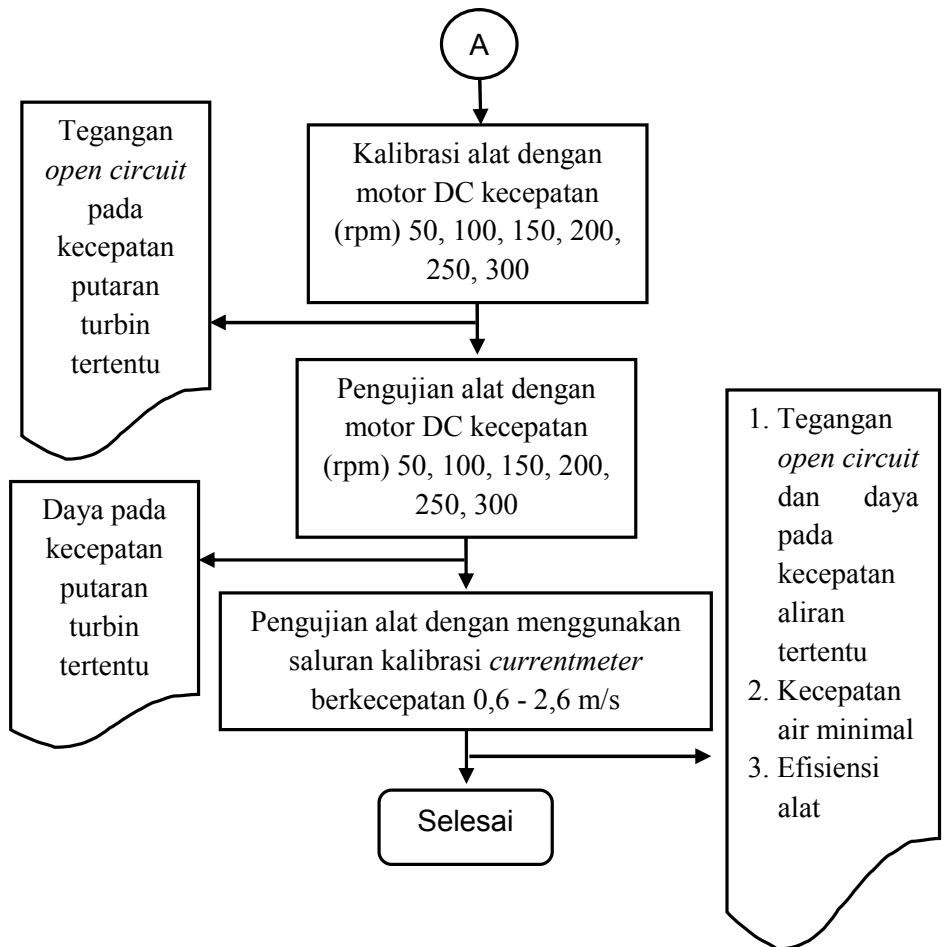
Kecepatan air minimal alat merupakan kecepatan air terendah dimana turbin pada alat sudah dapat berputar dan menghasilkan listrik.

3.6.4. Efisiensi Alat

Efisiensi alat merupakan kemampuan alat untuk dapat mengkonversi energi kinetik air menjadi energi listrik. Persamaan yang digunakan untuk menghitung efisiensi adalah seperti yang terdapat pada **persamaan 13**.

3.7. Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.12 Diagram alir penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pembahasan Umum

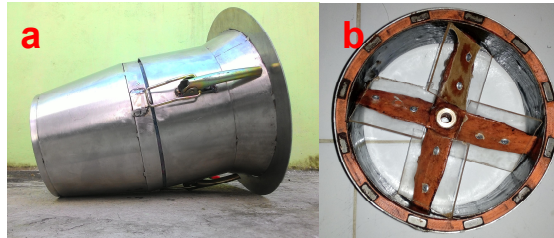
Pada tugas akhir ini dilakukan rancang bangun pembangkit listrik tenaga air bertipe *axial flow underwater turbine* dengan menggunakan *blade tip power system* dan *diffuser* dengan detail seperti yang telah dibahas sebelumnya. Secara umum, alat ini diuji dengan 2 metode, yaitu dengan menggunakan motor DC dan saluran kalibrasi *currentmeter*. Pengujian dengan menggunakan motor DC dilakukan dengan memutar turbin pada kecepatan 50 hingga 300 rpm yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan putar turbin terhadap nilai tegangan *open circuit* (V_{oc}) dan daya alat. Sedangkan pengujian dengan menggunakan saluran kalibrasi *currentmeter* dilakukan dengan kecepatan aliran air sebesar 0,6 hingga 2,6 m/s yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan aliran terhadap nilai V_{oc} , daya, kecepatan aliran air minimal serta efisiensi keseluruhan alat.

Hasil yang diharapkan dari tugas akhir ini adalah dirancangnya sebuah pembangkit listrik tenaga air yang dapat beroperasi secara efektif dan efisien sehingga dapat memaksimalkan pemanfaatan air tanpa harus merubah struktur sungai/saluran maupun membuat bangunan khusus. Dengan demikian, alat ini diharapkan dapat membantu program pemerintah dalam penyediaan energi serta pemerataan distribusi listrik di Indonesia.

4.2. Hasil Rancang Bangun

Berdasarkan desain perancangan struktural yang telah dilakukan, didapatkan sebuah alat dengan dimensi 353 x 340 x 340 mm. Sebagian besar dari alat ini terbuat dari *stainless steel 304* dengan tebal 2 mm. Hal ini dikarenakan pada alat ini dibutuhkan material yang kuat, tidak terpengaruh medan magnet, dan mudah dibentuk. Bagian alat yang terbuat dari material ini antara lain saluran penyetabil, rumah turbin dan generator, serta *diffuser*. Pada badan luar *diffuser* terdapat

pengait yang bertujuan untuk mengaitkan antara *diffuser* dengan saluran penyetabil yang dimana terdapat rumah rotor dan generator diantara keduanya. Kemudian, pada alat ini juga digunakan material *polylactid acid* (PLA) sebagai material utama turbin. Hasil rancang bangun dapat dilihat pada **Gambar 4.1**. Untuk dokumentasi pembuatan alat terlampir pada **Lampiran 5**.

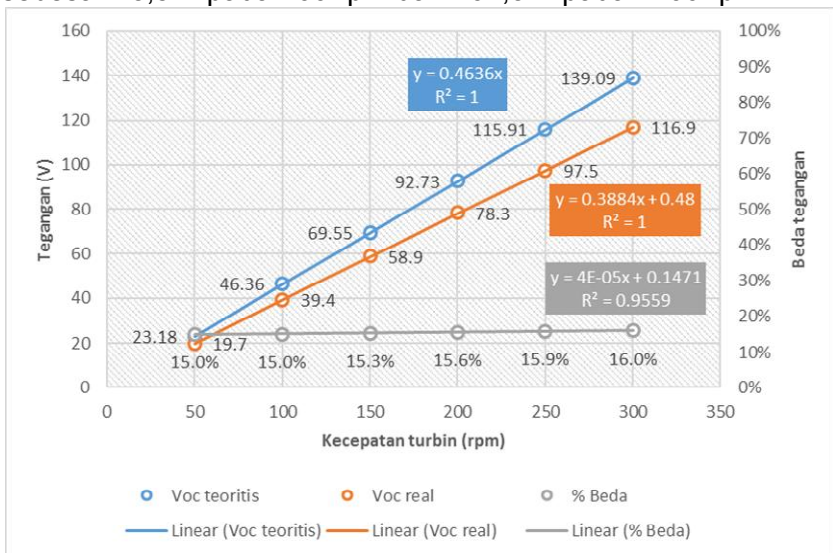


Gambar 4.1 Hasil rancang bangun (a) keseluruhan dan (b) turbin

4.3. Hasil Kalibrasi Alat

Menurut Dewi (2013), tegangan *open circuit* (V_{oc}) merupakan tegangan terbesar yang dapat dibangkitkan. Tegangan ini dapat diukur ketika rangkaian dalam keadaan terbuka sehingga arus yang mengalir memiliki nilai minimal (nol). Untuk mendapatkan data pengaruh kecepatan putaran turbin terhadap nilai V_{oc} , dilakukan pengujian dengan cara memutar turbin dengan menggunakan motor DC yang kecepatannya diatur menggunakan *power supply* dan diukur dengan *laser tachometer*. Hasil pengujian ini dapat dilihat pada grafik **Gambar 4.2**. Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai V_{oc} meningkat terhadap kecepatan putaran turbin, data terlampir pada **Lampiran 2**. Pada pengujian dengan kecepatan putaran 50 rpm dan 300 rpm didapatkan nilai V_{oc} berturut-turut adalah sebesar 19,8 V dan 116,9 V dengan peningkatan rata-rata sebesar 19,42 V pada setiap kenaikan kecepatan putar sebesar 50 rpm. Peningkatan nilai V_{oc} ini diakibatkan karena semakin cepatnya perubahan fluks magnetik yang terjadi pada kumparan sehingga gerak gaya listrik (ggl)

yang terinduksi pada ujung – ujung kawat tembaga akan semakin besar, sesuai dengan hukum Faraday yang menyatakan bahwa semakin cepat perubahan medan magnet maka induksi ggl akan semakin besar (Giancoli, 2001). Grafik hasil pengujian ini serupa dengan hasil penelitian Nurhadi (2011) yang menggunakan generator aksial 3 fasa, dimana pada penelitian tersebut dilakukan pengujian pada 100 – 700 rpm. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada kecepatan putaran 100 rpm didapatkan nilai V_{oc} setiap fasa sebesar 4,41 V dan pada 700 rpm sebesar 32,92 V dengan nilai yang terus meningkat terhadap kecepatan putaran yang diberikan. Begitupun dengan hasil penelitian Indriani (2015) yang dimana pada penelitian tersebut menggunakan generator radial 1 fasa dengan jarak celah 1 mm menghasilkan nilai V_{oc} sebesar 43,5 V pada 200 rpm dan 261,3 V pada 1400 rpm.



Gambar 4.2 Grafik pengaruh kecepatan putaran turbin terhadap nilai V_{oc} perhitungan dan pengujian

Selain itu, grafik hasil pengujian ini memiliki *trend* yang serupa dengan grafik perhitungan secara teoritis, namun memiliki nilai yang sedikit berbeda. Untuk mengetahui besar perbedaan nilai tersebut dapat dihitung dengan persamaan berikut (Mustofa, 2014).

$$\%Beda = \frac{V_{perhitungan} - V_{pengukuran}}{V_{perhitungan}} \times 100\% \dots\dots\dots (15)$$

Berdasarkan perhitungan dengan persamaan diatas didapatkan perbedaan antara nilai tegangan pengukuran dengan perhitungan secara teoritis sebesar 15-16%, data terlampir pada **Lampiran 2**. Nilai ini relatif lebih baik dibandingkan dengan hasil penelitian nurhadi (2011), pada penelitian tersebut didapatkan hasil perhitungan nilai V_{oc} pada 500 rpm sebesar 18,000315 V sedangkan berdasarkan hasil pengukuran sebesar 13,61 V dengan persentase 75,61% atau berbeda 35,49% dengan nilai perhitungan. Begitu juga dengan hasil penelitian Mustofa (2014), pada penelitian tersebut didapatkan beda nilai V_{oc} antara perhitungan dengan pengukuran sebesar 22% pada seluruh kecepatan putaran yang diujikan. Perbedaan antara nilai perhitungan dengan pengukuran ini dapat diakibatkan oleh kurang presisinya turbin yang dibuat dan adanya material lem *dextone* yang merekatkan kumparan dengan rumah rotor. Hal ini dapat mengakibatkan bertambahnya jarak antara magnet dengan kumparan. Sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Indriani (2015), dapat diketahui bahwa semakin besar jarak antara kumparan dengan magnet (celah udara) maka tegangan yang dihasilkan akan semakin kecil. Menurut Nurhadi (2011), perbedaan antara hasil perhitungan dengan hasil pengukuran pada generator dapat diakibatkan karena adanya faktor akurasi perakitan, pengukuran, kondisi tidak ideal, serta rugi-rugi.

4.4. Hasil Pengujian Alat

4.4.1. Pengaruh Kecepatan Putaran Turbin Terhadap Daya

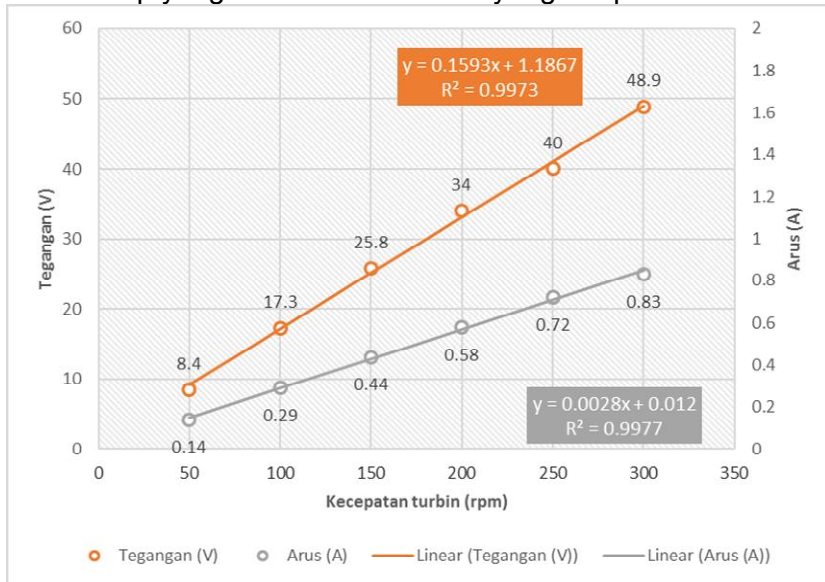
Metode untuk mendapatkan data pengaruh kecepatan putaran turbin terhadap daya secara garis besar serupa dengan pengujian sebelumnya. Namun, rangkaian pada pengujian ini dihubungkan dengan beban berupa resistor yang besarnya diubah-ubah untuk mendapatkan nilai daya maksimal sehingga mudah didapatkan nilainya pada putaran terendah tanpa harus mengganti beban. Hal ini dilandasi oleh persamaan berikut (Muallifah, 2009).

$$V = I \times R \dots\dots\dots (16)$$

Pada persamaan tersebut menunjukkan bahwa hambatan (R) berbanding lurus terhadap tegangan (V) namun berbanding terbalik terhadap arus (I). Sedangkan berdasarkan **persamaan 3** dapat diketahui bahwa daya (P) merupakan perkalian antara tegangan (V) dengan arus (I). Oleh karena hal tersebut, diperlukan nilai hambatan (R) yang tepat untuk mendapatkan nilai tegangan (V) dengan arus (I) yang optimal (*maximum power point*, MPP) sehingga didapatkan konversi daya (P) yang maksimal (Dewi, 2013). Berdasarkan perhitungan, resistor yang digunakan pada pengujian ini memiliki nilai hambatan rata-rata sebesar 58,56 Ω . Hasil pengujian ini dapat dilihat pada grafik **Gambar 4.3**.

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, didapatkan grafik tegangan dan arus yang terus meningkat terhadap peningkatan kecepatan putar, data terlampir pada **Lampiran 2**. Pada kecepatan turbin 50 rpm didapatkan tegangan sebesar 8,4 V dengan arus 0,14 A, sedangkan pada 300 rpm didapatkan tegangan sebesar 48,9 V dengan arus 0,83 A. Peningkatan tegangan yang terjadi setiap kenaikan 50 rpm kecepatan turbin rata-rata sebesar 8,1 V sedangkan arus sebesar 0,138 A. Hasil pengujian ini serupa dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Nurhadi (2011), pada pengujian generator *axial* 3 fasa hubung bintang (wye) didapatkan nilai tegangan dan arus pada 300 rpm

sebesar 13,08 V dan 0,06 A, sedangkan pada 700 rpm didapatkan tegangan 30,77 V dan arus 0,08 A. Pada penelitian tersebut didapatkan bahwa nilai arus tidak bertambah secara signifikan. Hal ini dikarenakan penelitian tersebut menggunakan beban tetap yang membutuhkan arus yang tetap.

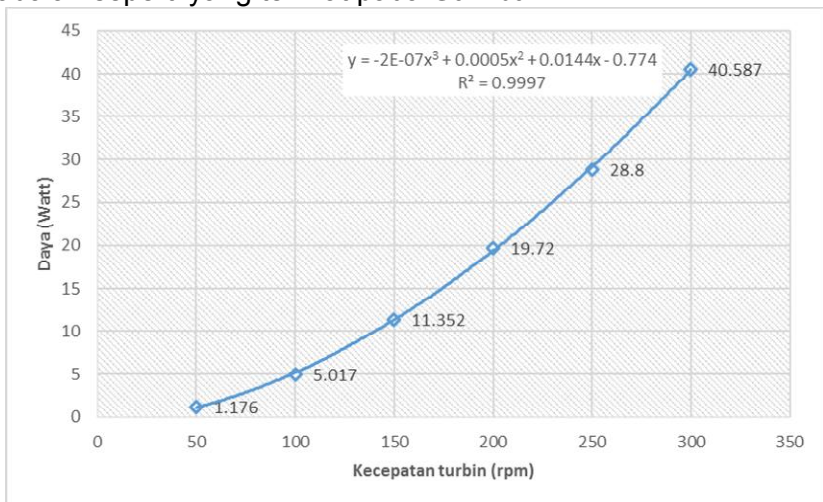


Gambar 4.3 Grafik pengaruh kecepatan putaran turbin terhadap tegangan berbeban dan arus

Namun, bila dibandingkan dengan data pengujian V_{oc} yang dilakukan sebelumnya, dapat diketahui bahwa adanya pembebanan menyebabkan nilai ggl induksi mengalami penurunan (*voltage drop*) yang diikuti oleh peningkatan nilai arus. Hal ini sering terjadi pada berbagai pembangkit listrik ketika diberikan beban. Menurut Mustofa (2014), penurunan tegangan atau tegangan jatuh ini dapat diakibatkan oleh adanya impedansi yang dimana nilainya tergantung pada beban. Impedansi sendiri merupakan besaran yang menyatakan besarnya hambatan total yang diberikan oleh resistor, induktor,

dan kapasitor terhadap arus bolak balik (Umar, 2008). Selain itu, tegangan jatuh ini juga dapat diakibatkan oleh adanya rugi-rugi tegangan terhadap beban yang meliputi resistansi jangkar, reaktansi bocor jangkar, dan reaksi jangkar (Mustofa 2014).

Berdasarkan data tegangan dan arus yang didapatkan, maka dapat dihitung nilai daya dengan menggunakan **persamaan 3**. Hasil dari perhitungan yang telah dilakukan adalah seperti yang terlihat pada **Gambar 4.4**.



Gambar 4.4 Grafik pengaruh kecepatan putaran turbin terhadap daya

Berdasarkan data hasil perhitungan yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa nilai daya meningkat terhadap kecepatan putaran turbin, data terlampir pada **Lampiran 2**. Pada hasil pengujian ini didapatkan daya pada kecepatan 50 rpm sebesar 1,176 Watt dan 40,587 Watt pada 300 rpm. Grafik hasil pengujian ini serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Nurhadi (2011), pada penelitian tersebut didapatkan daya pada 400 rpm sebesar 1,6631 Watt dan 3,4098 Watt pada 700 rpm. Begitu pula dengan penelitian dilakukan oleh Pramono (2015) yang dimana pada penelitian tersebut didapatkan daya pada

93,3 rpm sebesar 4,8 Watt dan 263,16 Watt pada 696 rpm. Peningkatan daya ini diakibatkan karena semakin cepatnya perubahan fluks yang terjadi pada kumparan sehingga ggl yang terinduksi semakin besar.

4.4.2. Pengaruh Kecepatan Aliran Air Terhadap Tegangan *Open Circuit*

Untuk mendapatkan data pengaruh kecepatan aliran air terhadap V_{oc} , dilakukan pengujian dengan menggunakan saluran kalibrasi *currentmeter* yang terdapat di Laboratorium Balai Sungai, Solo, Jawa Tengah. Pada pengujian ini, pembangkit listrik yang didesain digerakan oleh kereta dengan penggerak berupa motor AC. Dalam pengoperasiannya, kecepatan motor diatur dari tingkatan terendah hingga tertinggi, kemudian dari masing-masing tingkatan tersebut dihitung waktunya dalam menempuh jarak sepanjang 30 m sehingga didapatkan kecepatan kereta. Dengan pengujian tersebut, didapatkan grafik seperti pada **Gambar 4.5**. Dengan adanya data ini maka dapat dihitung kecepatan putar turbin dalam aliran air berdasarkan dengan data hasil kalibrasi yang telah dilakukan sebelumnya. Hal ini dikarenakan pada data tersebut nilai V_{oc} memiliki nilai yang spesifik terhadap kecepatan putar turbin. Untuk mendapatkan kecepatan putaran turbin dapat dihitung dengan persamaan interpolasi sebagai berikut.

$$x = x_1 + \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \times (y - y_1) \dots\dots\dots (17)$$

Keterangan:

x = kecepatan putar yang ingin diketahui (rpm)

y = tegangan pada kecepatan putar x (V)

x_1 = kecepatan putar batas bawah (rpm)

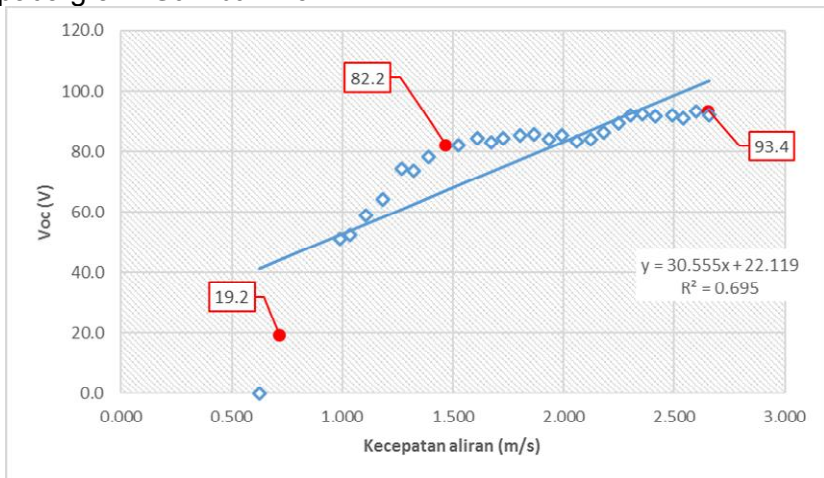
x_2 = kecepatan putar batas atas (rpm)

y_1 = V_{oc} batas bawah (V)

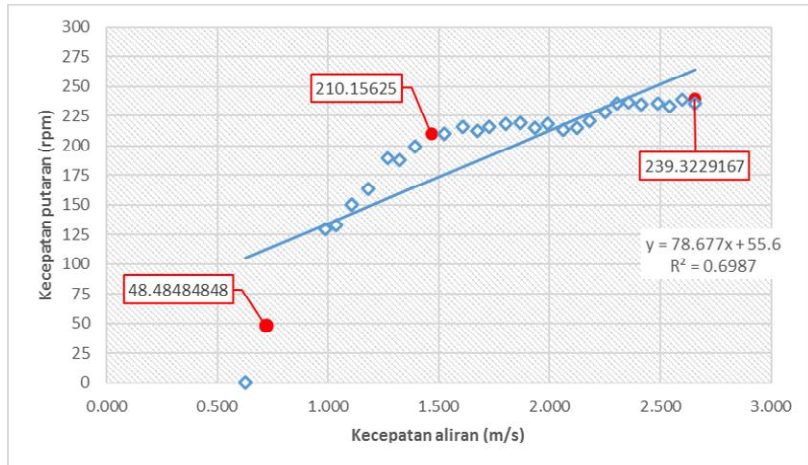
y_2 = V_{oc} batas atas (V)

} Data kalibrasi

Dengan persamaan interpolasi diatas maka dapat dihitung masing-masing kecepatan putaran turbin berdasarkan tegangan yang didapatkan pada kecepatan aliran air yang diberikan. Kecepatan putar batas atas (x_2) dan bawah (x_1) merupakan kecepatan putar yang diberikan oleh motor DC terhadap turbin, sedangkan V_{oc} batas atas (y_2) dan bawah (y_1) merupakan tegangan *open circuit* yang dihasilkan pada kecepatan putar tersebut. Adapun nilai y merupakan tegangan *open circuit* yang didapatkan dari pengujian menggunakan saluran kalibrasi *currentmeter*. Data hasil perhitungan interpolasi dapat dilihat pada grafik **Gambar 4.6**.



Gambar 4.5 Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap nilai V_{oc}



Gambar 4.6 Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap kecepatan turbin hasil interpolasi

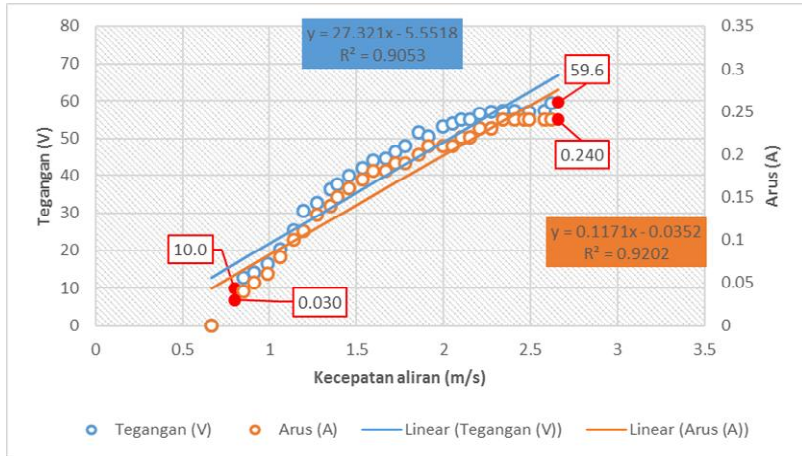
Berdasarkan grafik diatas dapat diketahui bahwa nilai V_{oc} meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran yang diberikan, data terlampir pada **Lampiran 3**. Pada kecepatan aliran 0,717 m/s didapatkan nilai V_{oc} sebesar 19,2 V dengan kecepatan turbin sebesar 48,48 rpm, sedangkan pada kecepatan 2,657 m/s didapatkan nilai V_{oc} sebesar 93,4 V dengan kecepatan turbin sebesar 239,323 rpm. Pada grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa pada kecepatan aliran diatas 1,524 m/s tidak terjadi peningkatan nilai V_{oc} dan kecepatan turbin yang signifikan seperti yang terjadi pada kecepatan dibawahnya. Hal ini dikarenakan turbin sudah mendekati kecepatan putar maksimalnya pada kecepatan aliran air tersebut, sehingga peningkatan kecepatannya terhadap aliran air menurun. Kecepatan maksimal inilah yang nantinya dapat mempengaruhi efisiensi turbin. Hasil pengujian ini serupa dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Sitomorang (2014) yang menggunakan pompa air sebagai turbin air reaksi. Pada pada penelitian tersebut didapatkan nilai efisiensi yang menurun setelah nilainya mencapai puncak pada debit 37 liter/menit.

Begitu juga dengan penelitian Warsito (2011) yang dimana desain turbin nanohidro pada penelitian tersebut memiliki kecepatan maksimal 2333 rpm pada debit $0,87 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Menurut Ikhsan (2011), pada turbin terdapat putaran maksimum dimana terjadi daya maksimum, sehingga apabila dibuat dalam bentuk grafik akan membentuk setengah parabola. Namun, hasil pengujian ini berbeda dengan hasil penelitian Subekti (2012) yang merancang pembangkit listrik tenaga air tipe *submersible* (aksial). Pada penelitian tersebut didapatkan kecepatan turbin sebesar 155,3 rpm pada head 0,41 m dan debit $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ serta 360 rpm pada head 1,2 m dan debit $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan grafik yang terus naik. Hal ini dikarenakan desain turbin belum mendekati kecepatan maksimalnya pada kecepatan aliran yang diberikan, sehingga kecepatan turbin terus meningkat seiring dengan peningkatan head dan debit.

Selain itu, berdasarkan perhitungan yang dilakukan dengan menggunakan **persamaan 13** dapat diketahui bahwa aliran air yang melalui alat pada seluruh kecepatan berjenis turbulen. Semakin tinggi kecepatan aliran airnya maka nilai bilangan Reynolds (Re) semakin besar dimana nilai terkecil pada kecepatan $0,717 \text{ m/s}$ adalah sebesar 155152,675 (data terlampir pada **Lampiran 3**).

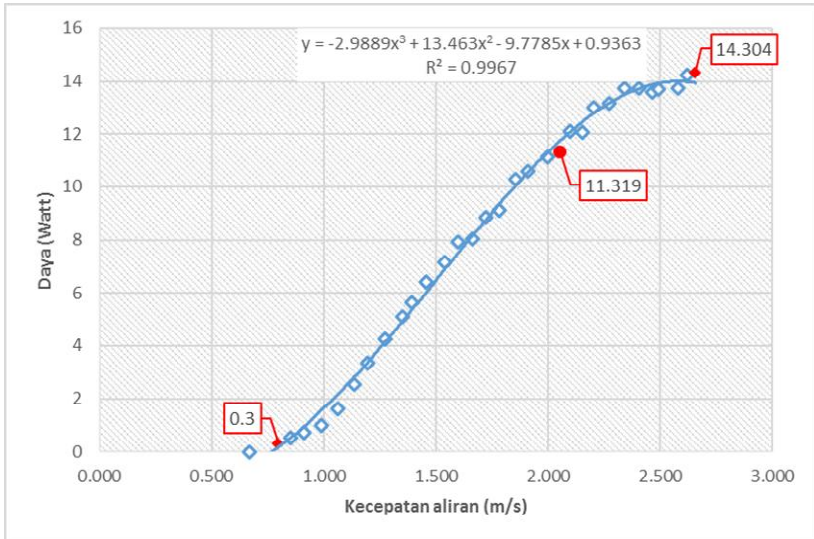
4.4.3. Pengaruh Kecepatan Aliran Air Terhadap Daya

Pada pengujian ini memiliki metode yang serupa dengan pengujian sebelumnya, namun pada pengujian ini ditambahkan resistor pada rangkaian yang digunakan sebagai beban. Pembebanan ini dimaksudkan untuk menginduksi arus, sehingga dapat dihitung nilai dayanya. Besarnya nilai hambatan resistor yang digunakan pada pengujian ini berubah-ubah dengan alasan yang sama seperti pada pengujian sebelumnya. Rata-rata besar nilai hambatan resistor yang digunakan berdasarkan perhitungan adalah sebesar $255,724 \Omega$. Hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada **Gambar 4.7**.



Gambar 4.7 Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap tegangan berbeban dan arus

Berdasarkan grafik diatas dapat diketahui bahwa tegangan dan arus berbanding lurus terhadap kecepatan aliran air, data terlampir pada **Lampiran 3**. Pada kecepatan aliran sebesar 0,798 m/s didapatkan nilai tegangan sebesar 10 V dan arus 0,03 A, sedangkan pada kecepatan aliran 2,62 m/s didapatkan nilai tegangan sebesar 59,6 V dan arus 0,24 A. Untuk mendapatkan nilai daya, maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan **persamaan 3** sehingga didapatkan grafik seperti pada **Gambar 4.8**.



Gambar 4.8 Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap daya

Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai daya berbanding lurus dengan kecepatan aliran air yang diberikan. Pada kecepatan aliran 0,798 m/s didapatkan daya sebesar 0,3 Watt, sedangkan pada kecepatan aliran 2,62 m/s sebesar 14,304 Watt. Hal ini dikarenakan daya yang diberikan air kepada turbin semakin besar, sehingga kecepatan putarannya semakin cepat. Data ini sesuai dengan **persamaan 2** yang dimana nilai daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan kecepatan aliran air yang diberikan. Trend hasil penelitian ini serupa dengan penelitian yang dilakukan Bussett (2014) yang menggunakan tipe *helical turbine*. Pada penelitian tersebut didapatkan bahwa pada kecepatan aliran 2,898 ft/s dihasilkan daya sebesar 0,3 Watt, sedangkan pada 6,66 ft/s dihasilkan daya sebesar 8,5 Watt. Begitu juga dengan penelitian Ibarra (2014) yang menggunakan tipe *axial flow turbine* didapatkan bahwa pada kecepatan 1,17 m/s dihasilkan daya sebesar 12,44 Watt dan 60,67 Watt pada 2 m/s.

Selain itu, berdasarkan perhitungan yang dilakukan dengan menggunakan **persamaan 13** dapat diketahui bahwa aliran air yang melalui alat pada seluruh kecepatan berjenis turbulen. Semakin tinggi kecepatan aliran airnya maka nilai bilangan Reynolds (Re) semakin besar dimana nilai terkecil pada kecepatan 0,798 m/s adalah sebesar 172519,459 (data terlampir pada **Lampiran 3**).

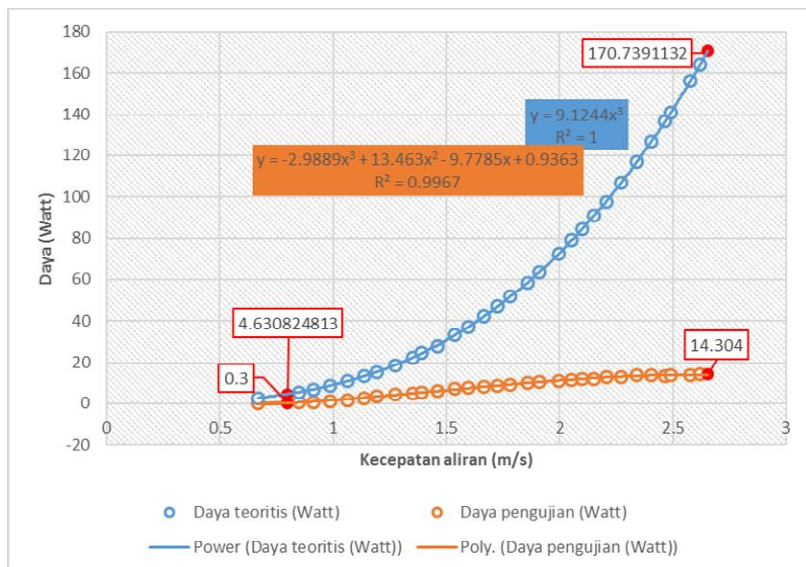
4.4.4. Kecepatan Aliran Air Minimal Alat

Kecepatan aliran air minimal alat merupakan kecepatan aliran air terkecil dimana turbin sudah mulai berputar dan menghasilkan daya. Analisa ini dilakukan dengan menggunakan saluran kalibrasi *currentmeter* bersamaan dengan pengujian sebelumnya. Indikator mulai berputarnya turbin adalah terinduksinya tegangan yang dibaca oleh multimeter. Pada hasil pengujian nilai V_{oc} didapatkan bahwa turbin mulai bergerak pada kecepatan 0,717 m/s, sedangkan hasil pengujian daya mulai berputar pada 0,798 m/s. Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa turbin pada pengujian nilai V_{oc} berputar pada kecepatan yang lebih rendah dibandingkan pada pengujian daya. Hal ini dikarenakan pada pengujian daya terdapat arus pada kumparan sehingga menimbulkan reaksi jangkar dan membentuk fluks jangkar. Pengaruh dari fluksi jangkar dapat berupa distorsi, penguatan, maupun pelemahan fluks medan pada celah udara (Bandri, 2013).

4.4.5. Perhitungan Efisiensi

Efisiensi alat merupakan tingkat kemampuan alat untuk dapat mengkonversi energi kinetik air menjadi energi listrik. Berdasarkan hukum Betz, efisiensi tertinggi pada pembangkit listrik tipe hidrokinetik maksimal adalah sebesar 59% (Vermaak, 2014). Persamaan yang digunakan untuk menghitung efisiensi adalah seperti yang terdapat pada **persamaan 14**. Pada persamaan tersebut dibandingkan antara daya hasil perhitungan teoritis dengan hasil pengujian. Perbandingan antara kedua variabel tersebut dapat dilihat pada grafik **Gambar 4.9**.

Berdasarkan grafik tersebut didapatkan bahwa terjadi perbedaan daya yang cukup besar diantara keduanya. Pada kecepatan aliran sebesar 0,798 m/s dan 2,62 m/s didapatkan daya teoritis berturut-turut sebesar 4,63 Watt dan 170,74 Watt. Sedangkan pada hasil pengujian pada kecepatan aliran yang sama didapatkan daya sebesar 0,3 Watt dan 14,304 Watt. Berdasarkan data yang diperoleh, dapat dihitung nilai efisiensi seperti pada **Gambar 4.10**.

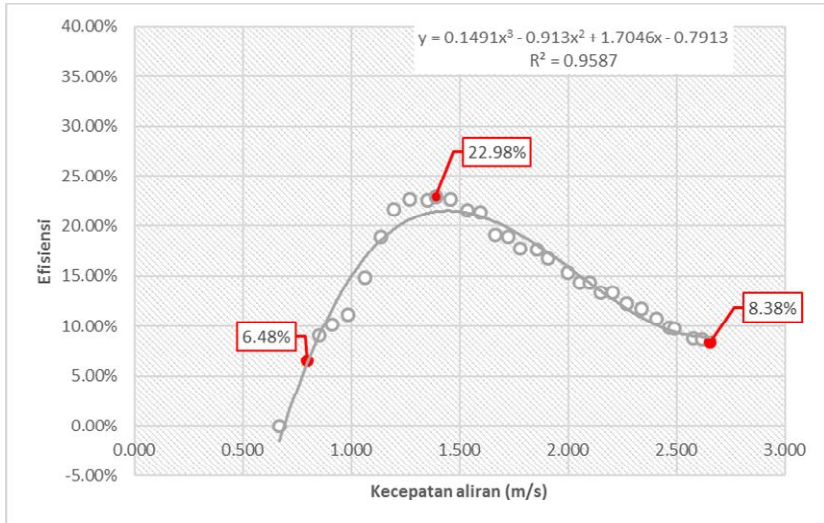


Gambar 4.9 Grafik perbandingan daya hasil perhitungan teoritis dengan daya hasil pengujian

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan grafik parabolik dengan nilai efisiensi tertinggi sebesar 22,98% pada kecepatan aliran 1,391 m/s, data terlampir pada **Lampiran 3**. Pada data tersebut dapat diketahui bahwa efisiensi meningkat hingga pada nilai tertinggi, kemudian grafik setelahnya terus menurun terhadap kecepatan aliran air diatas 1,391 m/s. Hasil pengujian ini serupa dengan penelitian Situmorang (2014) yang

dimana pada penelitian tersebut didapatkan grafik serupa dengan efisiensi tertinggi sebesar 11,1% pada debit 37 liter/menit. Hal serupa juga terdapat pada hasil penelitian Anam (2013) yang menggunakan turbin kinetik poros vertikal berbentuk mangkok, pada penelitian tersebut didapatkan efisiensi tertinggi sebesar 37,648% pada debit 0,0153 m³/s. Penurunan nilai efisiensi setelah mencapai nilai tertinggi dapat disebabkan oleh kenaikan kecepatan putar turbin yang tidak sebanding dengan kenaikan kecepatan aliran yang diberikan. Secara teoritis, hal ini dapat terjadi karena kecepatan aliran air pada persamaan daya yang dipangkatkan 3, sehingga memiliki grafik peningkatan yang sangat signifikan terhadap perubahan kecepatan aliran yang diberikan. Sedangkan pada kenyataannya, diketahui bahwa turbin memiliki batas kecepatan putaran pada kecepatan aliran air tertentu. Lain halnya dengan penelitian Subekti (2011) yang mendapatkan hasil berbeda. Pada penelitian tersebut didapatkan efisiensi yang semakin menurun terhadap peningkatan *head* yang diberikan. Hal ini dapat dikarenakan faktor manufaktur kemiringan sudu yang berbeda sehingga perputaran turbin terganggu.

Pada perhitungan ini juga dapat diketahui bahwa efisiensi alat diatas 20% terjadi pada kecepatan 1,194 m/s hingga 1,597 m/s. Berdasarkan data tersebut, maka dapat diketahui bahwa kecepatan aliran air yang dibutuhkan alat untuk beroperasi secara optimal adalah pada kecepatan aliran 1,194 m/s hingga 1,597 m/s.



Gambar 4.10 Grafik pengaruh kecepatan aliran air terhadap efisiensi

4.5. Perbandingan Alat

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, maka didapatkan spesifikasi/karakteristik dari alat yang dibuat pada tugas akhir ini. Pembangkit listrik pada tugas akhir ini membutuhkan kecepatan aliran air minimal sebesar 0,798 m/s untuk dapat beroperasi dengan efisiensi maksimal sebesar 22,98%. Selain pada tugas akhir ini juga telah banyak dikembangkan pembangkit listrik tenaga air tipe hidrokinetik lain. Perbandingan alat ini dengan beberapa pembangkit listrik tersebut seperti yang terlihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Perbandingan pembangkit listrik tipe hidrokinetik

Pengembang /peneliti	Tipe	Dalam (m)	v (m/s)	D (m)	Kap.	Ef. (%)
<i>Verdant Power</i> (mukherji, 2010)	U	7	1	5	35 kW	36
<i>Thropton Energy Services</i> (mukherji, 2010)	U	1,75	0,5- 1,5	4	2 kW	14
<i>Marlec</i> (mukherji, 2010)	U	1,75	0,45- 1,5	1,8	500 W	12
<i>Ibasei .ltd</i> (Jetro, 2013)	D	0,5	1,5-2	0,39	250 W	26
<i>Smart Hydro</i> (Smart- hydro.de, 2016)	D	2	1 - 2,8	1	5 kW	29
Anam (2013)	U	(debit, poros vertikal)		0,33	18,84 W	37
Subekti (2011)	D	(debit)		0,3	198,3 W	20
Satriyo (2016)	D	0,35	0,798	0,15	14,3 W	23

Keterangan: D = *Ducted (diffuser)*, U = *Unducted*

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian pada rancang bangun pembangkit listrik tenaga air tipe *axial flow underwater turbine* (hidrokinetik) menggunakan *diffuser* dengan generator magnet permanen radial 3 fasa 18S 12P *blade tip power system* yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Pada tugas akhir ini didapatkan hasil perancangan sebuah bangun/alat dengan dimensi keseluruhan sebesar 353 x 340 x 340 mm.
2. Tegangan *open circuit* (V_{oc}) berbanding lurus terhadap kecepatan putaran turbin, dengan nilai V_{oc} yang berbeda 15-16% dari perhitungan teoritis. Hasil ini dinilai cukup baik jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu. Selain itu, daya berbanding lurus terhadap kecepatan putar turbin dengan nilai pada 300 rpm mencapai 40,587 Watt.
3. Kecepatan aliran minimal yang dibutuhkan oleh turbin untuk menghasilkan daya adalah sebesar 0,798 m/s.
4. Tegangan *open circuit* (V_{oc}) berbanding lurus terhadap kecepatan aliran air yang diberikan dengan kenaikan nilai V_{oc} mulai menurun pada kecepatan 1,524 m/s karena sudah mendekati kecepatan putar maksimal. Berdasarkan hasil interpolasi didapatkan kecepatan putar turbin pada 2,657 m/s mencapai 239,322 rpm. Selain itu, daya berbanding lurus terhadap kecepatan aliran air dengan kenaikan nilai daya yang mulai menurun pada kecepatan diatas kecepatan aliran 2 m/s karena kecepatan putar turbin sudah mendekati kecepatan maksimalnya. Daya terbesar yang dicapai pada kecepatan 2,62 m/s dengan nilai mencapai 14,304 Watt.
5. Efisiensi alat terbesar terjadi pada kecepatan aliran 1,391 m/s dengan nilai 22,98%. Berdasarkan data nilai efisiensi, dapat diketahui bahwa alat beroperasi secara optimal pada kecepatan 1,194 m/s hingga 1,597 m/s dengan efisiensi diatas 20%.

5.2 Saran

Untuk meningkatkan daya dan efisiensinya, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Penelitian-penelitian yang dapat dilakukan selanjutnya adalah optimalisasi desain generator, turbin, panjang saluran, penyaringan, dudukan alat, sistem distribusi, serta dampak lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, M., Wahyono, E., Eko, H. 2008. **Rancang Bangun Rangkaian AC to DC Full Converter Tiga Fasa dengan Harmonisa Rendah**. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Alymov, Bakhtiyar. 2012. ***Assessing the Potential of TAM Wind Turbines at USC: Study Report***. The University of South Carolina. South Carolina.
- Anam, A., Soenoko, R., Widhiyanuriyawan, D. 2013. **Pengaruh Variasi Sudut Input Sudu Mangkok Terhadap Kinerja Turbin Kinetik**. Jurnal Rekayasa Mesin Vol. 4 No. 3 Hal. 199-203.
- Asy'ari, H., Jatmiko., Ardiyatmoko. 2012. **Desain Generator Magnet Permanen Kecepatan Rendah untuk Pembangkitan Listrik Tenaga Angin atau Bayu (PLTB)**. Dipresentasikan pada Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATI) pada tanggal 15-16 Juni 2012. Yogyakarta.
- Bandri, Sepannur. 2013. **Analisa Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Karakteristik Generator Sinkron (Aplikasi PLTG Pauh Limo Padang)**. Jurnal Teknik Elektro Vol. 2 No. 1 Hal. 42-48.
- Bussett, R., Chaggarls, C., O'Regan, M., Turgeon, A., **Design and Development of a Micro Power, Water Current Generator**. Worcester Polytechnic Institute. Worcester.
- Davidson, D. L. 2002. **The Role of Computational Fluid Dynamics in Process Industries**. *The Bridge, National Academy of Engineering*. hal 9-14.

- Dewi, A. Y. 2013. **Pemanfaatan Energi Surya sebagai Suplai Cadangan pada Laboratorium Elektro Dasar di Institut Teknologi Padang.** Jurnal Teknik Elektro Vol. 2 No. 3 Hal. 20-28.
- Dhany, R.R. 27 Juni 2014. **ESDM: 50 Juta Rakyat Indonesia Belum Nikmati Listrik.** <http://finance.detik.com>. Diakses pada tanggal 10 September 2014 pukul 18:46.
- Fela, R.F. 2013. **Bayangkan Negeri 1001 Pikohidro!.** EBTKE ConEx. Kementerian ESDM. Jakarta
- Fitradhana, E.A. 2012. **Studi Desain Rotor Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Jenis Cakram.** Universitas Indonesia. Depok.
- Giancoli, Douglas C. 2001. **Fisika Jilid 2 Edisi Kelima.** Penerbit Erlangga. Jakarta
- Hapsoro, C. A., Srigutomo, W. 2013. **Pemodelan Aliran Fluida 2-D pada Kasus Aliran Permukaan Menggunakan Metode Beda Hingga.** Jurnal Matematika & Sains Vol. 18 No. 3 Hal. 81-93.
- Ikhsaln, I., Hipi, M. A. 2011. **Analisis Pengaruh Pembebeanan terhadap Kinerja Kincir Angin Tipe Propeller pada Wind Tunnel Sederhana.** Skripsi. Universitas Hasanuddin. Makassar.
- Indriani, A. 2015. **Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Kutub dan Jarak Celah Magnet Rotor terhadap Performa Generator Sinkron Fluks Radial.** *Electrician - Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro* Vol. 9 No. 2 Hal. 62-71.

- JETRO (Japan External Trade Organization). 2013. **Cappa+++**. Ibasei, ltd. Jepang
- Khunthongjan, Palapum. 2012. **A Study of Diffuser Angle Effect on Ducted Water Current Turbine Performance Using CFD**. *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 34 (1): 61-67.
- Matsushima, T., Takagi, S., Muroyama, S. 2005. **Characteristic of a Highly Efficient Propeller Type Small Wind Turbine with Diffuser**. *Article in press, Elsevier Renewable Energy* xx, hal 1-12.
- Muallifah, Faqih. 2009. **Perancangan dan Pembuatan Alat Ukur Resistivitas Tanah**. *Jurnal Neutrino* Vol. 1 No. 2 Hal. 179-197.
- Mukherji, S. S. 2010. **Design and Critical Performance Evaluation of Horizontal Axis Hydrokinetic Turbines**. Masters Theses Paper S430. Missouri University of Science and Technology. Rolla.
- Munson, Bruce. 2005. **Mekanika Fluida Jilid 2 Edisi Keempat**. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Mustofa, 2014. **Perancangan Pembangkit Listrik Menggunakan Generator Magnet Permanen Dengan Motor DC sebagai Prime Mover**. Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik. Universitas Pakuan. Bogor.
- Nishi, Y., Inagaki, T., Okubo, K., Kikuchi, N. 2014. **Study on an Axial Flow Hydraulic Turbine with Collection Device**. *International Journal of Rotating Machinery* Hal. 1-11.

- Nugroho, H. Y. S. H., Sallata, M. K. 2015. **PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro) Panduan Lengkap Membuat Sumber Energi Terbarukan Secara Swadaya**. Penerbit ANDI. Yogyakarta.
- Nurhadi, A., Sukmadi, T., Karnoto. 2011. **Perancangan Generator Putaran Rendah Magnet Permanen Jenis Fe Fluks Aksial**. Jursan Teknik Elektro, Fakultas Teknik. Universitas Diponegoro. Semarang.
- Nurtjahjomulyo, A. 2010. **Rancang Bangun Generator Turbin Angin Tipe Aksial Kapasitas 200 W**. Bidang Konversi Energi Dirgantara, LAPAN. Jakarta.
- Opperman, A. J. 2011. **Analysis of Factors Influencing the Performance of a Zero Head Hydro Energy Harvester**. Nelson Mandela Metropolitan University. South Africa.
- Pauliza, Oza. 2008. **Fisika Kelompok Teknologi dan Kesehatan**. Penerbit Grafindo Media Pratama. Jakarta.
- Panagan, T., Heni Y., Jojor U. G. 2011. **Analisis Kualitatif dan Kuantitatif Asam Lemak Tak Jenuh Omega-3 dari Minyak Ikan Patin (*Pangasius pangasius*) dengan Metoda Kromatografi Gas**. *Jurnal Penelitian Sains*. Vol. 14 No. 4 (C): 14409.
- Pietersz, R., Soenoko, R., Wahyudi, S. 2013. **Pengaruh Jumlah Sudi Terhadap Optimalisasi Kinerja Turbin Kinetik Roda Tunggal**. *Jurnal Rekayasa Mesin* Vol. 4 No. 2 Hal. 93-100.
- Pramono, W. P., Warindi., Hidayat, A. 2015. **Perancangan Mini Generator Turbin Angin 200 W untuk Energi Angin**

Kecepatan Rendah. Prosiding SNATIF ke-2 Tahun 2015. Universitas Sunan Muria Kudus. Kudus

- Prisandi, C. H. 2011. ***Studi Desain Kumparan Stator pada Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator.*** Skripsi. Universitas Indonesia. Depok.
- Priyadarshan. 2010. **Computational Analysis on the Performance of Conical Diffuser and Annular Diffuser.** Paper presented to The 37th National and 4th International Conference on Fluid Mechanic and Fluid Power, Chennai, IIT Madras, 16-18 Desember. Dilihat pada 8 September 2014, http://www.me.iitb.ac.in/~fmfp/FMFP%20PROC/cf_26.pdf
- Purwaningsih, S.S., Eniarti D. 2007. ***Kondisi Sosial Ekonomi Masyarakat di Lokasi Coremap II Desa Jago-Jago, Kabupaten Tapanuli Tengah.*** Hasil BME, COREMAP-LIPI.
- Putra, A. E. 2014. ***Perancangan dan Pembuatan Generator Fluks Radial Satu Fasa Menggunakan Lilitan Kawat Sepeda Motor dengan Variasi Diameter Kawat.*** Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik. Skripsi. Universitas Bengkulu. Bengkulu.
- Ratnata, I.W., Wasimudin S. S., Maman S. 2013. ***Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air di Saluran Air Sekitar Universitas Pendidikan Indonesia.*** FPTK Expo 2013. Universitas Pendidikan Indonesia. Bandung.
- Sabersky, R. H., Allan, J. A. 1964. ***Fluid Flow, a First Course in Fluid Mechanics.*** The Macmilan Company. New York.

- Santiago, J., Bernhoff, H. 2010. **Comparison Between Axial and Radial Flux PM Coreless Machines for Flywheel Energy Storage.** *J. Electrical System* 6-2 (2010).
- Situmorang, H. B., Soplanit, G. D., Gede, I. N. 2014. **Unjuk Kerja Pompa Air Shimizu Type PS-128 Bit yang Difungsikan Sebagai Turbin Air.** *Jurnal Online Poros Teknik Mesin* Vol. 3 No. 1 Hal. 52-65.
- Smart Hydro Power. 2016. **Smart Turbine, Smart Monofloat.** <http://smart-hydro.de/hydrokinetic-turbines-river-canal/>. Diakses pada tanggal 18 April 2016 Pukul 11.32.
- Subekti, R. A., Susatyo, A., Irasari, P. 2011. **Perancangan dan Analisis Prototip Unit Turbin-Generator Tipe Submersible Skala Piko Hidro untuk Aplikasi pada Aliran Sungai Datar.** Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik, LIPI. Bandung.
- Sulistiyono. 2013. **Studi Potensi Pembangkitan Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Sungai Cikawat Desa Talang Mulia Kecamatan Padang Cermin Kabupaten Pesawaran Propinsi Lampung.** *Jurnal FEMA* Vol. 1 No. 1 Hal. 48-58.
- Suryanto, A., Samiyono. 2011. **Implementasi Model Analisis Perbaikan Faktor Daya Listrik Rumah Tangga dengan Simulasi Perangkat Lunak.** *Jurnal Kompetensi Teknik* Vol. 3 No. 1 Hal. 47-55.
- Umar, Efrizon. 2008. **Buku Pintar Fisika.** Penerbit Media Pusindo. Jakarta.
- Vermaak, H. Kusakana, K., Koko, S. P. 2014. **Status of Micro-Hydrokinetic River Technology in Rural**

Applications: A Review of Literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 29 Hal. 625-633.

Wang, J. B., Xia, Z. P., Howe, D. 2005. **Three-phase Modular Permanent Magnte Brushless Machine for Torque Boosting on a Downsized ICE Vehicle.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 54 No. 3 Hal. 809-816.

Welty, J. R. 2004. **Dasar-dasar Fenomena Transport Volume 1: Transfer Momentum Edisi Ke-4.** Penerbit Erlangga. Jakarta.

WindTronics, 2011. **BTPS 6500 Wind Turbine - Blade Tip Power System.** WindTronics™ Inc. Muskegon.

Yilmaz, T., 1982. **Numerical Solution of Navier-Stokes Equation for Laminar Fluid Flow in Rows of Plates in Staggered Arrangement.** *International Journal of Heat Fluid* Vol. 3 No. 4 Hal. 201-206.

Zuhal. 2004. **Prinsip Dasar Elektroteknik.** Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.

Lampiran 1. Perhitungan Desain Generator

A. Frekuensi alat pada 300 rpm

$$f = \frac{n.p}{120} = \frac{300rpm.12}{120} = 30Hz$$

B. Kerapatan fluks magnet maksimal (B_{\max})

$$\begin{aligned} B_{\max} &= Br \cdot \frac{lm}{lm + \delta} \\ &= 1,15T \cdot \frac{0,05m}{0,05m + 0,005m} \\ &= 1,045T = 1,045Wb / m^2 \end{aligned}$$

C. Luasan magnetik (A_{mag})

$$\begin{aligned} A_{\text{mag}} &= \frac{\pi(r_0^2 - r_i^2) - f(r_0 - r_i)Nm}{Nm} \\ &= \frac{3,14((0,167m)^2 - (0,155m)^2) - 0,028m(0,167 - 0,155)12}{12} \\ &= 0,000676m^2 \end{aligned}$$

D. Fluks magnet maksimal (Φ_{\max})

$$\begin{aligned} \phi_{\max} &= A_{\text{mag}} \cdot B_{\max} \\ &= 0,000676m^2 \cdot 1,045Wb / m^2 \\ &= 0,00070673Wb \end{aligned}$$

E. Tegangan yang terinduksi tiap fasa pada 300 rpm (E_{ph})

$$E_{ph} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_{ph} \cdot k_w \cdot k_s \cdot \phi_{\max}$$

$$= \frac{2.3,14}{\sqrt{2}} \cdot 30\text{Hz} \cdot 500 \cdot 1.0,984 \cdot 0,00070673\text{Wb}$$

$$= 46,3636744\text{Volt} \times 3 \text{ (3 fasa)} = 139,091\text{Volt}$$

Kemudian persamaan tersebut diaplikasikan pada kecepatan 50, 100, 150, 200, dan 250 rpm, sehingga didapatkan data seperti berikut.

Kecepatan turbin (rpm)	Frekuensi (Hz)	E_{ph} (V)
50	5	23,181
100	10	46,363
150	15	69,545
200	20	92,727
250	25	115,909
300	30	139,091

F. Arus yang terinduksi pada daya maksimal (I)

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi}$$

$$= \frac{300\text{Watt}}{\sqrt{3} \cdot 139,0910232\text{Volt} \cdot \cos 0}$$

$$= 1,245264265\text{A}$$

Lampiran 2. Hasil pengujian dengan menggunakan motor DC

A. Data hasil pengujian

Kecepatan turbin (rpm)	V_{oc} (V)	V_{beban} (V)	I_{beban} (A)	P (Watt)
50	30.3	8.4	0.14	1.176
100	43.3	17.3	0.29	5.017
150	58.9	25.8	0.44	11.352
200	78.3	34	0.58	19.72
250	97.5	40	0.72	28.8
300	116.9	48.9	0.83	40.587

B. Perhitungan beda tegangan antara pengujian dengan perhitungan

Kecepatan turbin (rpm)	Frekuensi (Hz)	$V_{teoritis}$	$V_{pengujian}$	Perbedaan
50	5	23,181	19.7	15%
100	10	46,363	39.4	15%
150	15	69,545	58.9	15,3%
200	20	92,727	78.3	15,6%
250	25	115,909	97.5	15,9%
300	30	139,091	116.9	16%
Rata-rata				15,5%

Lampiran 3. Hasil pengujian dengan menggunakan saluran kalibrasi *currentmeter*

A. Tegangan Open Circuit (V_{oc})

Kecepatan aliran (m/s)	V_{oc} (V)	Re
0.626	0.0	135486.675
0.717	19.2	155152.005
0.990	51.1	214069.840
1.035	52.2	223817.070
1.108	58.9	239691.794
1.183	64.2	255853.977
1.270	74.2	274585.563
1.322	73.5	285835.104
1.391	78.2	300809.312
1.468	82.2	317439.181
1.524	82.1	329530.567
1.609	84.5	347906.534
1.674	83.0	362079.066
1.729	84.5	373974.459
1.804	85.3	390165.777
1.867	85.7	403762.095
1.935	84.1	418610.120
1.992	85.5	430840.429
2.060	83.6	445635.774
2.125	84.2	459522.441
2.182	86.4	471887.772

2.251	89.2	486755.954
2.304	92.1	498345.381
2.358	92.4	510098.810
2.414	91.6	521999.748
2.490	92.1	538461.151
2.542	91.1	549869.226
2.597	93.3	561771.157
2.655	93.4	574199.723
2.657	92.0	574708.314

B. Perhitungan Interpolasi kecepatan putar terhadap V_{oc}

Kecepatan aliran (m/s)	Kecepatan putar turbin (rpm)
0.626	0
0.717	48.484
0.990	130
1.035	132.820
1.108	150
1.183	163.659
1.270	189.432
1.322	187.628
1.391	199.742
1.468	210.156
1.524	209.895
1.609	216.145
1.674	212.239
1.729	216.145

1.804	218.229
1.867	219.270
1.935	215.104
1.992	218.75
2.060	213.802
2.125	215.364
2.182	221.093
2.251	228.385
2.304	235.937
2.358	236.718
2.414	234.635
2.490	235.937
2.542	233.333
2.597	239.062
2.655	239.322
2.657	235.677

C. Daya

Kecepatan aliran (m/s)	Tegangan (v)	Arus (A)	Daya (W)	Re
0.669	0	0	0	144605.680
0.798	10.0	0.030	0.3	172519.459
0.850	12.8	0.040	0.512	183913.176
0.912	14.1	0.050	0.705	197157.608
0.987	16.3	0.060	0.978	213576.592
1.063	20.3	0.080	1.624	229842.609
1.138	25.4	0.100	2.54	246054.489
1.194	30.6	0.110	3.366	258298.442
1.272	32.7	0.130	4.251	275051.160
1.351	36.3	0.140	5.082	292272.832
1.391	37.6	0.150	5.64	300809.312
1.457	40.0	0.160	6.4	315126.608
1.537	42.1	0.170	7.157	332400.454
1.597	44.1	0.180	7.938	345314.362
1.665	44.6	0.180	8.028	360069.748
1.724	46.5	0.190	8.835	372899.820
1.780	48.1	0.190	9.139	385071.624
1.856	51.5	0.200	10.3	401513.420
1.910	50.5	0.210	10.605	413014.441
1.997	53.1	0.210	11.151	431987.807
2.053	53.9	0.210	11.319	444110.668
2.099	55.0	0.220	12.1	454055.764
2.151	54.9	0.220	12.078	465122.356
2.204	56.5	0.230	12.995	476741.871

2.271	57.1	0.230	13.133	491177.658
2.340	57.2	0.240	13.728	506119.880
2.406	57.2	0.240	13.728	520325.330
2.465	56.5	0.240	13.56	533151.756
2.490	57.1	0.240	13.704	538461.151
2.577	57.2	0.240	13.728	557427.566
2.655	59.6	0.240	14.304	574199.723
2.620	59.3	0.240	14.232	566677.455

D. Efisiensi

Kecepatan aliran (m/s)	Daya teoritis (Watt)	Daya pengujian (Watt)	Efisiensi
0.668	2.727	0	0.00%
0.797	4.630	0.3	6.48%
0.850	5.610	0.512	9.13%
0.911	6.911	0.705	10.20%
0.987	8.786	0.978	11.13%
1.062	10.950	1.624	14.83%
1.137	13.435	2.54	18.91%
1.194	15.542	3.366	21.66%
1.271	18.766	4.251	22.65%
1.351	22.516	5.082	22.57%
1.390	24.548	5.64	22.98%
1.457	28.222	6.4	22.68%
1.536	33.122	7.157	21.61%
1.596	37.135	7.938	21.38%
1.664	42.102	8.028	19.07%

1.724	46.764	8.835	18.89%
1.780	51.495	9.139	17.75%
1.856	58.377	10.3	17.64%
1.909	63.538	10.605	16.69%
1.997	72.704	11.151	15.34%
2.053	78.998	11.319	14.33%
2.099	84.425	12.1	14.33%
2.150	90.749	12.078	13.31%
2.204	97.722	12.995	13.30%
2.271	106.871	13.133	12.29%
2.340	116.924	13.728	11.74%
2.405	127.048	13.728	10.81%
2.465	136.677	13.56	9.92%
2.489	140.801	13.704	9.73%
2.577	156.210	13.728	8.79%
2.654	170.739	14.304	8.38%
2.620	164.116	14.232	8.67%

Lampiran 4. Surat permohonan penggunaan Laboratorium Balai Sungai



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
Jl. Veteran, Malang 65145, Telp. (0341) 551611 Pes.220
Langsung : (0341) 580106, 564398, Fax. (0341) 568917
E-mail : ftp_ub@ub.ac.id http://www.tp.ub.ac.id

Nomor : 106 /UN10.10/AK/2016
Lampiran : -
Perihal : *Permohonan Penggunaan Laboratorium*

Kepada Yth. : Kepala Balai Sungai
Puslitbang Sumber Daya Air
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jl. Solo - Kartosuro Km 7, PO Box 159, Surakarta 57101, Jawa Tengah

Dalam rangka Menyelesaikan **Tugas Akhir** di Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Brawijaya, bersama ini kami mohon dengan hormat mahasiswa kami di bawah ini :

Nama Mahasiswa	NIM	Jurusan
Budi Satryo	125100601111017	Keteknikan Pertanian

di bawah bimbingan : 1. Dr. Ir. Bambang Dwi Argo, DEA.
2. Rini Yulianingsih, STP., MT.

Diperkenankan untuk dapat masuk / meminjam alat / menggunakan Lab. di **Laboratorium** yang Saudara Pimpin sesuai dengan aturan yang berlaku.

Demikian, atas bantuan dan ijin yang diberikan kami sampaikan terima kasih.



Malang, 29 Maret 2016

Dr. Krisna Wardani

STP., M.Si., PhD.

NIP. 19690807 199702 2 001

Tembusan :
1. Arsip

Lampiran 5. Dokumentasi kegiatan



Gambar 1. Pembuatan alat



Gambar 2. Turbin yang digunakan



Gambar 3. Magnet neodymium N35



Gambar 4. Proses peresinan turbin



Gambar 5. Pemasangan turbin



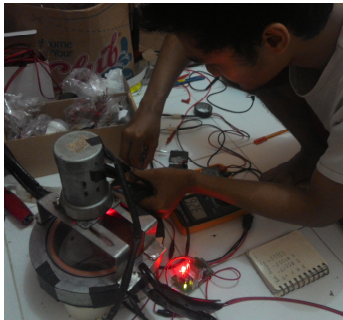
Gambar 6. Rangkaian keseluruhan alat



Gambar 7. Pembuatan kumparan



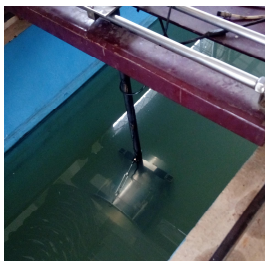
Gambar 8. Pemasangan kumparan



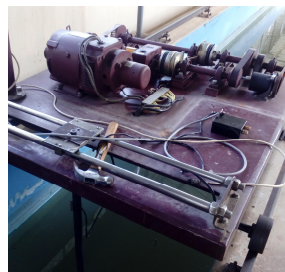
Gambar 9. Pengujian dengan motor DC



Gambar 10. Rangkaian pengujian



Gambar 11. Pengujian dengan saluran kalibrasi *currentmeter*



Gambar 12. Motor AC yang digunakan

